

Energianalys av hygieniseringssystem – jämförelse av befintlig pastörisering med integrerad termofil hygienisering på Kungsängens gårds biogasanläggning i Uppsala

*Energy analysis of sanitation systems
– comparison of existing pasteurization and integrated
thermophilic sanitation at the biogas plant Kungsängens
gård in Uppsala*

Johanna Grim

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Johanna Grim

Energianalys av hygieniseringssystem - jämförelse av befintlig pastörisering med integrerad termofil
hygienisering på Kungsängens gårds biogasanläggning i Uppsala
Energy analysis of sanitation systems - comparison of existing pasteurization and integrated
thermophilic sanitation at the biogas plant Kungsängens gård in Uppsala

Handledare: Peter Malmros, Uppsala Vatten
Ämnesgranskare: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Per-Anders Hansson, institutionen för energi och teknik, SLU

EX0724, Examensarbete i energisystem 30 hp, Avancerad nivå, A2E, teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Serienamn: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
ISSN 1654-9392
2014:07

Uppsala 2014

Nyckelord: biogas, hygienisering, pastörisering, energibehov, biogasproduktion

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Abstract

The biogas plant Kungsängens gård, owned by Uppsala Vatten och Avfall AB, produces biogas and biomanure from organic household waste, food processing waste and slaughterhouse waste. In year 2012, 4.4 million Nm³ of biogas were produced from 25 200 tons of waste. Before digestion all substrate is sanitized by one hour's pasteurization at 70°C in order to kill pathogens. Another method, integrated thermophilic sanitation (ITS), is of interest in order to decrease the energy demand. The method implies that the substrate is sanitized during ten hours in the digestion chamber, where the temperature is 52°C.

The purpose of this thesis was to compare pasteurization with integrated thermophilic sanitation from an energy point of view. The pasteurization's impact on biogas production and energy yield was examined through experiments with two laboratory digesters, of which one was fed with pasteurized substrate and the other with non-pasteurized substrate. For the present pasteurization system, electricity and heat demand was surveyed. For the integrated thermophilic sanitation, a process design was developed and dimensioned and the electricity and heat demand was calculated. Thereafter, the energy yield and energy demand for the two sanitation systems were compared.

The result showed that pasteurization had no effect on biogas production. The energy yield was on average 4.79 kWh/kg VS from non-pasteurized substrate and 4.74 kWh/kg VS from pasteurized substrate. There was no statistically significant difference between the reactors.

The energy audit showed that pasteurization required 0.48 kWh/kg VS, which is 85 % of the total energy consumption at the facility. The digester warming demanded 0.077 kWh/kg VS for RK1 and 0.031 kWh/kg VS for RK2. The electricity consumption was 0.041 kWh/kg VS.

The process of ITS was designed with a heat exchange from bio manure to substrate, followed by heating to 52°C by steam addition. The heat requirement was 0.24 kWh/kg VS and the electricity demand was 0.034 kWh/kg VS. The warming of the digesters was the same as in the present pasteurization system.

The comparison between the existing pasteurization and the ITS showed that switching systems would save 0.243 kWh/kg VS or 46 % of the present energy consumption. This corresponds to annual savings of 1.22 GWh.

A sensitivity analysis showed that the results were sensitive to assumptions regarding the heat exchanger in the case of ITS. 10 % energy losses resulted in smaller savings, 34 % or 0.91 GWh per year.

There are increased risks of process disruptions if ITS is combined with an increased organic loading rate. 4.2 % reduction of the total biogas production erases the energy savings which means that it is important that process stability is ensured.

Sammanfattning

Uppsala Vatten och Avfall AB:s biogasanläggning Kungsängens gård producerar biogas och biogödsel från organiskt hushållsavfall, livsmedelsavfall och slakteriavfall. År 2012 producerades 4,4 miljoner Nm³ biogas från 25 200 ton avfall. Före rötning pastöriseras allt substrat vid 70°C i en timme för att avdöda patogener. För att minska energiförbrukningen är en annan hygieniseringsmetod, integrerad termofil hygienisering, intressant. Det innebär att substratet hygieniseras under tio timmar direkt i rötkammaren, där temperaturen är 52°C.

Syftet med detta examensarbete var att ur ett energiperspektiv jämföra den nuvarande pastöriseringen med integrerad termofil hygienisering. Pastöriseringens påverkan på biogasproduktionen undersöktes genom försök med två rötkammare i labbskala, där den ena matades med pastöriserat substrat och den andra med icke pastöriserat substrat. El- och värmebehov kartlades för den nuvarande pastöriseringen. En möjlig processutformning vid integrerad termofil hygienisering togs fram och dimensionerades och el- och värmebehov beräknades. Därefter jämfördes energiutbytet och energibehovet för de två hygieniseringssystemen.

Resultaten visade att pastöriseringen inte påverkade biogasproduktionen. Energiutbytet var i genomsnitt 4,79 kWh/kg VS för reaktorn med icke pastöriserat substrat och 4,74 kWh/kg VS för reaktorn med pastöriserat substrat. Det fanns således ingen statistiskt säkerställd skillnad mellan reaktorerna.

Energikartläggningen av den befintliga pastöriseringen visade att själva pastöriseringen krävde 0,48 kWh/kg VS, vilket är 85 % av hela anläggningens värmeförbrukning. Varmhållningen av rötkamrarna krävde 0,077 kWh/kg VS för RK1 och 0,031 kWh/kg VS för RK2. Elförbrukningen var 0,041 kWh/kg VS.

Processen för integrerad termofil hygienisering utformades med en värmeväxling av substratet mot rötrestlagret och spetsvärmning till 52°C genom ångtillsats i de befintliga pastöriseringstankarna. Värmebehovet beräknades till 0,24 kWh/kg VS och elbehovet till 0,034 kWh/kg VS. Varmhållningsbehovet var samma som i det befintliga systemet.

Jämförelsen mellan den befintliga pastöriseringen och integrerad termofil hygienisering visade att 0,243 kWh/kg VS eller 46 % av dagens värmeförbrukning i hygieniseringsdelen skulle sparas genom ett systembyte. Det motsvarar på årsbasis 1,22 GWh.

En känslighetsanalys visade att resultatet var känsligt för antaganden kring värmeväxlaren i fallet med integrerad termofil hygienisering. Förluster på 10 % gav en mindre värmebesparing, 34 % eller 0,91 GWh/år.

Det finns dock risk för störningar om integrerad termofil hygienisering kombineras med en ökad organisk belastning. 4,2 % minskning av den totala biogasproduktionen uttraderar energibesparingen vilket innebär att det är mycket viktigt att processtabiliteten säkerställs.

Exekutiv sammanfattning

På Uppsala Vatten och Avfall AB:s biogasanläggning Kungsängens gård pastöriseras allt substrat vid 70°C i en timme för att avdöda patogener. För att minska energiförbrukningen är en annan hygieniseringsmetod, integrerad termofil hygienisering, intressant. Det innebär att substratet hygieniseras under tio timmar direkt i rötkammaren, där temperaturen är 52°C.

Syftet med detta examensarbete var att ur ett energiperspektiv jämföra den nuvarande pastöriseringen med integrerad termofil hygienisering. Pastöriseringens påverkan på biogasproduktionen undersöktes genom labbförsök. El- och värmebehov kartlades för den nuvarande pastöriseringen. En processutformning vid integrerad termofil hygienisering togs fram och el- och värmebehov beräknades. Därefter jämfördes energiutbytet och energibehovet för de två hygieniseringssystemen.

Resultaten visade att pastöriseringen inte påverkade biogasproduktionen och energiutbytet. Energibehovet visade sig däremot minska med 46 % vid ett byte till integrerad termofil hygienisering. Det motsvarar på årsbasis 1,22 GWh. Det är dock mycket viktigt att processtabiliteten säkerställs vid ett byte av hygieniseringssystem eftersom endast 4,2 % minskning av den totala biogasproduktionen uttraderar energibesparingen.

Förord

Detta examensarbete har utförts inom Civilingenjörsprogrammet i Energisystem vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har genomförts på Uppsala Vatten och Avfall AB:s biogasanläggning Kungsängens gård, i samarbete med Institutionen för energi och teknik samt Institutionen för mikrobiologi på SLU. Peter Malmros, processingenjör på biogasanläggningen, har varit handledare och Åke Nordberg, forskare på Institutionen för energi och teknik, har varit ämnesgranskare.

Först och främst vill jag tacka Peter för ditt engagemang och för alla givande diskussioner som har hjälpt mig att komma vidare när jag stött på problem. Ett stort tack riktas också till kollegorna på biogasanläggningen, för att ni sett till att mina energimätare kommit på plats och för många skratt på kafferasterna. Tack Åke för att du alltid tagit dig tid att svara på mina frågor.

Jag vill också tacka Anna Schnürer, professor på Institutionen för mikrobiologi, för all hjälp i labbet och med att analysera resultaten. Även Liselott Roth, Mathias Bohman, Oscar Tottie och Magali Raffier på Grontmij ska ha stort tack för ert intresse för och värdefulla synpunkter på mitt arbete.

Tack till Staffan Grönholm på vattenlaboratoriet för lånet av värmeskåpet. Jag vill även tacka personalen på biogaslabbet för att ni tagit hand om helgmatningen av reaktorerna.

Slutligen vill jag tacka alla kunniga yrkesmänniskor som har tagit fram data, hjälpt till med dimensioneringar och svarat på mina frågor. Jag är mycket tacksam för den hjälpsamhet och positiva attityd jag har mött i mitt arbete med det här projektet.

Johanna Grim
Uppsala 20/1-2014

Ordlista

Biogas

Den gas som bildas vid anaerob rötning. Består av ca 60-70 % metan och 30-40 % koldioxid samt små halter av exempelvis vattenånga, vätesulfid och kvävgas.

Fordonsgas

Uppgraderad biogas till fordonskvalitet, ca 97 % metan. Även fossil naturgas kan kallas fordonsgas.

Substrat

Organiskt nedbrytbart material som används i biogasprocessen. Till exempel matavfall, gödsel eller slakteriavfall.

Samrötningsanläggning

Biogasanläggning som rötar flera olika sorters substrat. Ofta i anslutning till kommunal avfallshantering.

Mesofil rötning

Biogasprocess med rötkammartemperatur 30-35°C.

Termofil rötning

Biogasprocess med rötkammartemperatur 50-60°.

Hydraulisk uppehållstid

Genomsnittlig tid som substratet befinner sig i rötkammaren.

Organisk belastning

Mängd tillfört organiskt material per rötkammarvolym och dygn. Mäts i kg VS/m³,dygn.

TS – torrsubstans

Fraktion av substratet som finns kvar efter torkning. Mäts i % av våtvikt.

VS – volatile solids

Organisk fraktion av substratet, det som kan förbrännas. Mäts i % av våtvikt eller i % av TS. I denna rapport som % av TS.

Ymp

Rötkammarmaterial innehållande mikroorganismer. Tas från en befintlig biogasprocess för att starta en ny.

Hygienisering

Behandling av substratet för att avdöda patogener. Kan ske genom exempelvis uppvärmning.

Pastörisering

Den vanligaste hygieniseringsmetoden på biogasanläggningar. Innebär upphettning av substratet till 70°C i minst en timme.

Integrerad termofil hygienisering

Hygienisering i rötkammaren. Garanterad uppehållstid 10 timmar vid 52°C. Hydraulisk uppehållstid minst sju dygn.

Biogasutbyte

Biogasproduktion från en viss mängd organiskt material. Mäts i Nm³/kg VS.

Metanhalt

Andel av biogasen som är metan.

Metanutbyte

Metanproduktion från en viss mängd organiskt material. Mäts i Nm³/kg VS. Metanutbyte = biogasutbyte * metanhalt.

Energiutbyte

Energiproduktion från en viss mängd organiskt material. Mäts i kWh/kg VS. Energiutbyte = metanutbyte * värmevärde för metan.

Innehåll

1	Inledning	10
1.1	Biogas allmänt	10
1.2	Hygienisering	10
1.3	Uppsala Vatten och biogasanläggningen Kungsängens gård	11
2	Syfte	11
3	Mål	11
4	Övergripande metod	12
5	Avgränsningar	12
6	Teori	12
6.1	Biogasprocessen	12
6.2	Driftparametrar	13
6.3	Gas	14
6.4	Termodynamik	15
6.5	El	17
7	Metod för laboratorieförsök	18
7.1	Labbuppställning	18
7.2	Substrat	18
7.3	Pastörisering	19
7.4	Mätning av processparametrar	20
8	Metod för energikartläggning – pastörisering	21
8.1	Processbeskrivning	21
8.2	Energikartläggning	23
9	Metod för dimensionering och energikartläggning – integrerad termofil hygienisering	28
9.1	Möjlig processutformning	28
9.2	Uppskattning av värmebehov	30
9.3	Uppskattning av elbehov	30
10	Metod för jämförelse av hygieniseringssystemen	30
11	Resultat från laboratorieförsök	31
11.1	Biogasproduktion	31
11.2	TS och VS	31
11.3	Energiutbyte	32

11.4	pH och fettsyror	32
12	Energikartläggning av pastörisering	32
12.1	Verkningsgrader	32
12.2	Energibehov för varmhållning av rötkammaren	33
12.3	Energibehov för pastörisering	33
12.4	Validering av energibehov för pastörisering	34
12.5	Fördelning av värmeförbrukning	35
12.6	Elbehov	35
13	Dimensionering och energikartläggning av integrerad termofil hygienisering	36
13.1	Översiktlig dimensionering	36
13.2	Val av systemutformning	38
13.3	Dimensionering och energibehov	40
13.4	Elbehov	42
14	Jämförelse av hygieniseringssystemen	43
15	Känslighetsanalys	44
15.1	Befintlig pastörisering – pannans förbrukning av biogas	44
15.2	Integrerad termofil hygienisering – modellen av värmeväxlaren	45
16	Ekonomisk analys	45
17	Diskussion	46
17.1	Labbförsök – jämförelse med verkligheten	46
17.2	Labbförsök – energiutbyte och stabilitet	47
17.3	Energibehov för dagens pastörisering	48
17.4	Energibehov för integrerad termofil hygienisering	49
17.5	Jämförelse av systemen	49
18	Slutsats	50
18.1	Förslag på vidare studier	51
19	Referenser	52
19.1	Skriftliga	52
19.2	Personlig kontakt	54
	Bilaga A – Labbresultat	56
	A.1 TS och VS	56
	A.2 pH och fettsyror	56

A.3 Gasflöde	57
A.4 Gaskromatografianalys	58
Bilaga B – Elförbrukning pumpar och omrörare	60
B.1 Drifttider och installerad effekt	60
B.2 Pumpar med nya frekvensomformare	61
B.3 Pumpar och omrörare med gamla frekvensomformare	62
Bilaga C – Korrigering av gasflödesmätning	64

1 Inledning

1.1 Biogas allmänt

Biogas är ett förnybart bränsle som bidrar till att uppnå EU:s mål om 20 % förnybar energiproduktion och, uppgraderad till fordonsgas, målet om 10 % förnybara drivmedel till 2020 (Energimyndigheten, 2012). Svenska reningsverk har producerat biogas sedan 1960-talet men biogasproduktion i samrötningsanläggningar är en relativt ung bransch, då de första byggdes under 1990-talet (Energigas Sverige, 2013a). Biogasproduktionen ökar i Sverige och 2011 producerades totalt 1473 GWh biogas i 233 produktionsanläggningar. 28 % av gasen producerades i centrala samrötningsanläggningar (Gyrulf, 2012).

Biogasens miljöpåverkan och kostnadseffektivitet beror till stor del på anläggningens effektivitet. Forskningen idag fokuserar bland annat på att förbättra utbytet i befintliga anläggningar (Energimyndigheten, 2013a). Eftersom ca 20-40 % av den producerade energin går åt till att driva själva biogasanläggningen (Berglund & Börjesson, 2003) är det möjligt att göra ekonomiska och miljömässiga vinster både genom att öka biogasproduktionen från en viss mängd substrat och genom att minska energiinsatsen i processen.

1.2 Hygienisering

Många vanliga substrat på samrötningsanläggningar, som slakteriavfall och organiskt avfall från hushåll och livsmedelsindustri, räknas som animaliska biprodukter (ABP) av kategori 3. Hantering av dessa regleras i EU:s förordningar 1069/2009 och 142/2011 (Jordbruksverket, 2011a). Regelverket medför krav på hygienisering för att minska risken för spridning av patogener. Tidigare har den enda tillåtna metoden varit pastörisering, vilket innebär uppvärmning till 70°C i 60 minuter. År 2007 trädde dock EU-förordning 208/2006, som öppnar för alternativa hygieniseringsmetoder, i kraft. Enligt förordningen får behörig myndighet, i Sveriges fall Jordbruksverket, godkänna andra temperaturer och behandlingstider (Norin, 2007). Jordbruksverket har godkänt termofil rötning vid 52°C i 10 timmar som hygienisering, om den hydrauliska uppehållstiden är minst 7 dygn och ytterligare krav på hur processen ska säkerställas uppfylls (Jordbruksverket, 2011b). Metoden kallas i denna rapport för integrerad termofil hygienisering.

Pastörisering kan även ha annan påverkan på substratet än avdödning av patogener. Flera studier har visat att värmebehandlingen har en positiv effekt på biogasproduktionen. En studie visade att pastörisering av slakteriavfall gav 20 % ökning av metanpotentialen jämfört med obehandlat substrat (Luste et al., 2011). I en annan studie var metanpotentialen hos pastöriserad kogödsel 30 % högre än hos opastöriserad. Pastöriseringen var då positiv för nettoenergibalansen, vilket innebär att den ökade metanproduktionen var större än det ökade värmebehovet (Luste & Luostarinen, 2011). Det högre metanutbytet beror troligen på att värmebehandlingen minskar partikelstorleken och därmed ökar substratets löslighet och tillgänglighet för mikroorganismer (Luste et al., 2011; Rodriguez et al., 2011). Rodriguez et al. (2011) visade att pastörisering hade varierande effekt på olika typer av material. För substrat

med hög kolhydrathalt innebar pastörisering ingen ökad metanpotential, medan denna ökade med 53 % för substrat med mycket protein och fett, i detta fall slaktbiprodukter av svin. Den uteblivna effekten för det kolhydratrika substratet kan bero på att kolhydrater bildar svårnedbrytbara föreningar vid upphettning (Rodriguez et al., 2011).

Hygienisering vid lägre temperatur än 70°C är intressant eftersom det skulle innebära ett lägre energibehov för processen och därmed ett högre energiutbyte för hela anläggningen. Men en lägre hygieniseringstemperatur skulle också kunna påverka metanutbytet från substratet negativt. Ur ett systemperspektiv är det därför viktigt att väga det minskade energibehovet mot en eventuellt minskad metanproduktion.

1.3 Uppsala Vatten och biogasanläggningen Kungsängens gård

Uppsala Vatten och Avfall AB är ett kommunalt bolag som har drivit biogasanläggningen Kungsängens gård sedan 1996. Anläggningen rötar organiskt hushållsavfall, livsmedelsavfall och slakteriavfall. 2012 behandlades 25 200 ton avfall och 4,4 miljoner Nm³ biogas motsvarande 27 600 MWh producerades (Barck-Holst, 2013).

Allt inkommande material förbehandlas innan det tillförs de två rötkammarna. Ett steg i förbehandlingen är pastörisering vid 70°C i en timme, vilket utförs i tre separata pastöriseringstankar. Under 2010 gjordes en energikartläggning på biogasanläggningen med slutsatsen att pastöriseringen var en av de mest energikrävande delarna (Andersson, 2011). Därför är det intressant att undersöka vilka effekter en annan hygieniseringsmetod skulle få för energiförbrukningen och metanutbytet. Temperaturen i rötkamrarna är 52°C, vilket innebär att processen är termofil och att integrerad termofil hygienisering skulle vara möjlig.

2 Syfte

Syftet med detta examensarbete var att ur ett energiperspektiv jämföra den befintliga hygieniseringsmetoden på Kungsängens gård, pastörisering vid 70°C i en timme, med den alternativa metoden integrerad termofil hygienisering.

3 Mål

Det övergripande syftet bröts ner i följande mål.

- Fastställa vilket metanutbyte som erhålls från substratet med de olika hygieniseringsmetoderna.
- Kartlägga de olika hygieniseringsmetodernas värme- och elbehov.
- Övergripande kartlägga nödvändig utrustning för de olika hygieniseringsmetoderna med avseende på pumpar, värmeväxlare med mera.
- Jämföra förhållandet mellan insatt energi och energiutbyte för de olika hygieniseringsmetoderna.

4 Övergripande metod

Projektet var uppdelat i två delar, en laborativ del och en energidel.

De olika hygieniseringsmetodernas effekt på metanpotentialen analyserades genom laborationsförsök på SLU:s biogaslabb i Uppsala. Två termofila provreaktorer användes med respektive utan föregående pastörisering. Ympen och substratet kom från biogasanläggningen Kungsängens gård. Producerad gasmängd och koldioxidhalt mättes sex dagar per vecka. Även matningen skedde en gång per dag, sex dagar i veckan. pH och fettsyror i rötkammarinnehållet mättes en gång per vecka. Biogasens innehåll av metan mättes under två begränsade perioder. Tillvägagångssättet i laborationsdelen finns utförligt beskrivet i kapitel 7.

Den andra delen av projektet innebar kartläggning av energibehovet för de två olika hygieniseringsmetoderna. Energikartläggningen inleddes med en planeringsfas där systemgränser och mätmetoder definieras. Sedan kartlades den befintliga pastöriseringens värme- och elbehov. Metoden finns närmare beskriven i kapitel 8. Därefter togs en möjlig processutformning för integrerad termofil hygienisering fram och dimensionerades, och värme- och elbehovet beräknades. Tillvägagångssättet beskrivs i kapitel 9.

Under slutet av mätperioden började analysen av insamlad data, och därefter följde den slutliga analysen. Metanutbyte sattes i relation till energibehov och de två hygieniseringsmetoderna jämfördes. Detta finns närmare beskrivet i kapitel 10.

Arbetet med rapporten pågick under hela projektiden.

5 Avgränsningar

Energikartläggningen inriktades enbart på de delar av processen som ansågs relevanta för hygieniseringen. Förbrukningen av tryckluft utelämnades. Möjliga energibesparingar hos det befintliga systemet, utan byte av hygieniseringsmetod, har inte analyserats.

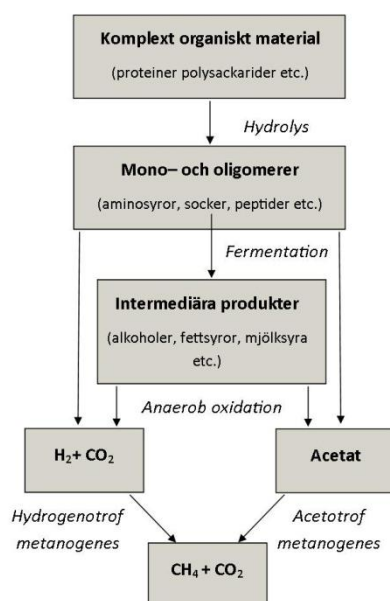
6 Teori

6.1 Biogasprocessen

Biogas består av 55-80 % metan och 20-45 % koldioxid (Christensson et al., 2009) samt spårgaser som vattenånga, kvävgas och vätesulfid. Biogas bildas vid anaerob nedbrytning av organiskt material. Processen sker i flera steg som kräver olika typer av mikroorganismer. Huvudstegen är hydrolys, fermentation, anaerobisk oxidation samt metanogenes, se Figur 1.

I hydrolysen bryts stora organiska molekyler, som proteiner och fetter, ner till små, som aminosyror och fettsyror. Detta sker med hjälp av enzymer som utsöndras av vissa mikroorganismer och är ett viktigt steg eftersom de ursprungliga molekylerna är för stora för

att tas upp av mikroorganismer. Nedbrytningens hastighet beror på substratets sammansättning, exempelvis omsätts proteiner snabbare än cellulosa. I nästa steg, fermentationen, deltar många mikroorganismer för att bryta ner hydrolysisprodukterna. Bland annat bildas alkoholer, fettsyror och andra intermediära produkter. Dessa bryts ner vidare till acetat och vätgas genom anaeroba oxidationer. Mikroorganismerna i detta steg har ett viktigt samarbete med metanbildarna i metanogenesen. För att den anaeroba oxidationen ska fungera får inte vätgaskoncentrationen bli för hög, och denna hålls nere av metanbildarna som konsumerar antingen acetat eller vätgas för att bilda metan (Jarvis & Schnürer, 2009).



Figur 1. Biogasprocessens nedbrytningssteg. Efter Jarvis & Schnürer (2009).

6.2 Driftparametrar

Biogasprocessen är komplex och påverkas av mikrobiell sammansättning, vilket substrat som rötas samt fysiska och kemiska förhållanden i rötkammaren. I biogasprocessen är många olika organismer aktiva och miljön i rötkammaren måste därför passa så många som möjligt tillräckligt bra för att de ska kunna växa (Jarvis & Schnürer, 2009). Nedan beskrivs några viktiga processparametrar.

6.2.1 Temperatur

Olika mikroorganismer växer bäst vid olika temperaturer och de flesta metanbildare är aktiva i ett av två intervall. Mesofila organismer trivs bäst vid 30-35°C medan termofila organismer är mest aktiva vid 50-60°C. I intervallet däremellan hämmas metanbildarna. Därför är biogasprocesser antingen mesofila eller termofila. Det finns även psykrofila processer med lägre temperaturer, men de är ovanliga (Gerardi, 2003).

Det är viktigt att ha en stabil temperatur i rötkammaren eftersom bara ett par graders förändring hämmar metanbildarna (Gerardi, 2003).

6.2.2 pH

Mikroorganismer har olika krav på pH för att växa bra, men de flesta trivs vid ett neutralt pH kring 7,0–7,5. Flera processer i Sverige fungerar dock med ett pH kring 8 (Jarvis & Schnürer, 2009). Ett alltför lågt pH hämmar metanbildarna (Gerardi, 2003).

6.2.3 Organisk belastning

Den organiska belastningen på biogasprocessen är ett mått på hur mycket nytt substrat som tillförs per tidsenhet. Denna mäts i kg VS/m³ rötkammare och dag. Det är viktigt att ha en adekvat belastning på rötkammaren. Om belastningen är för låg produceras lite biogas, och är den noll kommer processen så småningom att avstanna. Är belastningen å andra sidan för hög hinner inte metanbildarna med och det bildas överskott av intermediära produkter, exempelvis fettsyror. Detta leder till att pH sjunker och processen blir instabil (Jarvis & Schnürer, 2009). Den organiska belastningen beräknas enligt ekvation 1.

$$OLR = \frac{V_{tillsatt} \cdot TS \cdot VS \cdot 1000}{V_{RK}} \quad (1)$$

där

OLR = organisk belastning [kg VS/m³]

V_{tillsatt} = daglig tillsatt volym [m³/dygn]

V_{RK} = aktiv rötkammarvolym [m³].

6.2.4 Hydraulisk uppehållstid

Den hydrauliska uppehållstiden anger hur lång tid det tar att byta ut allt material i rötkammaren. Hur lång den ska vara beror på hur lätt substratet är att bryta ner och temperaturen i rötkammaren. Ett substrat med mycket socker går till exempel snabbt att bryta ner och uppehållstiden kan vara relativt kort. Uppehållstiden är ofta 10-25 dygn, men kan ibland vara längre (Jarvis & Schnürer, 2009). Den hydrauliska uppehållstiden (HRT) beräknas enligt ekvation 2.

$$HRT = \frac{V_{RK}}{V_{tillsatt}} \quad (2)$$

6.3 Gas

För ideala gaser gäller att volymen (V) hos en viss massa (m) av gasen förändras med temperaturen (T) och trycket (p) enligt ekvation 3, den ideala gaslagen (Alvarez, 2006).

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (3)$$

där

R = gaskonstanten för den aktuella gasen [J/kgK].

En normalkubikmeter (Nm³) är den mängd gas som upptar volymen en kubikmeter vid ett visst tryck och en viss temperatur. För biogas definieras en normalkubikmeter vid 1,01 bars tryck och 0°C (Energigas Sverige, 2013b). En normalkubikmeter metan innehåller 9,97 kWh (Svenskt gastekniskt center, 2006).

6.4 Termodynamik

6.4.1 Värmemängdsändring och värmekapacitet

När värme förs över från ett system till ett annat sker en värmemängdsändring i båda systemen. Den överförda värmen mellan tillstånden 1 och 2 kan beräknas enligt ekvation 4 (Alvarez, 2006).

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (4)$$

där

Q_{12} = överförd värme [kJ]

m = massa [kg]

c = specifik värmekapacitet [kJ/kgK]

$t_{2,1}$ = temperatur vid tillstånd 2 respektive 1 [K].

Den specifika värmekapaciteten är den värmemängd som behöver tillföras en massenhet för att höja temperaturen en grad. Värmekapaciteten är egentligen en funktion av temperaturen, men i praktiken är det tillräckligt att räkna med ett medelvärde (Alvarez, 2006).

Värmekapaciteten hos substratet på en biogasanläggning beror främst på TS-halten och kan beräknas enligt ekvation 5 (Svahn, 2006).

$$C = \frac{(100-TS) \cdot 4,180 + TS \cdot 1,050}{100} \quad (5)$$

där

c = specifik värmekapacitet för substratet [kJ/kgK]

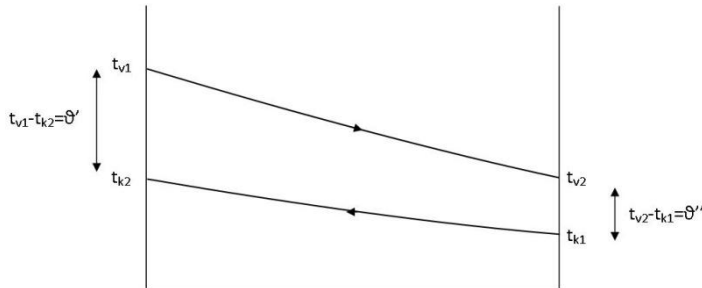
TS = torrsustanshalt [%].

6.4.2 Värmeväxling och energiverkningsgrad

En värmeväxlares syfte är att föra över värme från ett medium till ett annat. Oftast är medierna skilda från varandra, och skiljeväggen bör då ha så hög värmegenomgångskoefficient (k-värde) som möjligt. Beläggningar på skiljeväggen försämrar k-värdet och minskar därmed värmeöverföringen (Alvarez, 2006).

Värmeväxlare delas in i tre olika typer beroende på mediernas strömningsriktningar. I en medströmsvärmeväxlare strömmar medierna åt samma håll, i en motströmsvärmeväxlare åt motsatt håll och i en tvärströmsvärmeväxlare är strömningsriktningarna vinkelräta (Alvarez 2006). Figur 2 visar ett temperaturdiagram för en motströmsvärmeväxlare. t_{v1} och t_{v2} är det varma mediets temperatur före respektive efter värmeväxlaren, och t_{k1} och t_{k2} motsvarande för det kalla mediet. I en medströmsvärmeväxlare kan inte det kalla mediets

utloppstemperatur t_{k2} överstiga det varmas t_{v2} . Det är däremot möjligt i en motströmsvärmeväxlare. Motströmskoppling ger även behov av mindre yta än medströmskoppling för samma effektöverföring (Alvarez, 2006).



Figur 2. Temperaturdiagram för en motströmsvärmeväxlare. Efter Alvarez (2006).

För att beräkna båda mediernas uttemperaturer vid givna driftförutsättningar hos en motströmsvärmeväxlare kan ekvation 6 och 7 användas (Alvarez, 2006).

$$\frac{\vartheta'}{\vartheta'_i} = e^a \quad (6)$$

där

$$a = \frac{k \cdot A}{\dot{m}_v \cdot c_v} \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_v \cdot c_v}{\dot{m}_k \cdot c_k}\right) \quad (7)$$

och

ϑ' = temperaturskillnad mellan medierna före värmeväxlaren. För en motströmsvärmeväxlare $t_{v1} - t_{k2}$ [K]

ϑ'' = temperaturskillnad mellan medierna efter värmeväxlaren. För en motströmsvärmeväxlare $t_{v2} - t_{k1}$ [K]

k = värmegenomgångstal [W/m²K]

A = värmeväxlarens area [m²]

$\dot{m}_{v,k}$ = massflöde av det varma respektive kalla mediet [kg/s]

$c_{v,k}$ = specifik värmekapacitet för det varma respektive kalla mediet [J/kgK].

Det varma mediets uttemperatur t_{v2} beräknas enligt

$$t_{v2} = \left(1 - \frac{\dot{m}_v \cdot c_v}{\dot{m}_k \cdot c_k}\right) / \left(\frac{\vartheta'}{\vartheta'_i} - \frac{\dot{m}_v \cdot c_v}{\dot{m}_k \cdot c_k}\right) \cdot (t_{v1} - t_{k1}) + t_{k1}. \quad (8)$$

Det kalla mediets uttemperatur beräknas enligt

$$t_{k2} = t_{v1} - \frac{\vartheta'}{\vartheta'_i} \cdot (t_{v2} - t_{k1}). \quad (9)$$

Den överförda effekten från det varma mediet ges av ekvation 10 och den överförda effekten till det kalla mediet ges av ekvation 11 (Alvarez, 2006).

$$P_v = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - t_{v2}) \quad (10)$$

$$P_k = \dot{m}_k \cdot c_k \cdot (t_{k2} - t_{k1}), \quad (11)$$

Om inga förluster finns i systemet överförs all energi från den varma till den kalla sidan och $P_v = P_k$. I praktiken finns förluster på grund av värmestrålning från ledningar och själva värmeväxlaren. I denna rapport definieras *energiverkningsgraden* som kvoten mellan värmeökningen på den kalla sidan och värmeminskningen på den varma sidan. Om energiverkningsgraden är 90 % har alltså 90 % av värmen som tagits ut från den varma sidan tillförts den kalla. 10 % är förluster. Energiverkningsgraden ges av ekvation 12.

$$\eta_{en} = \frac{P_k}{P_v} = \frac{\dot{m}_k \cdot c_k \cdot (t_{k2} - t_{k1})}{\dot{m}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - t_{v2})} \quad (12)$$

För att förhindra att medierna blandas vid läckage har man ibland en vattenkrets mellan det varma och det kalla mediet. Det varma mediet värmeväxlas då mot en vattenkrets som i sin tur värmeväxlas mot det kalla mediet. Överföring i flera steg ger generellt mer förluster och därmed en lägre total energiverkningsgrad.

6.5 El

6.5.1 Induktionsmotorer

Induktionsmotorer, eller asynkronmotorer, är den vanligaste motortypen inom industrin, och utgör omkring 70-80 % (Crowder, 2006). En induktionsmotor består av en stator med en trefaslindning och en rotor som har kortslutna lindningar. Ofta är rotorn konstruerad som en robust metallbur, och kallas då "squirrel cage" (Schavemaker & van der Sluis, 2008). Till skillnad från synkronmaskiner, där effekt överförs om det finns en vinkelskillnad mellan rotor och statorspänningar fungerar en induktionsmotor genom skillnad i rotationshastighet.

Om statorn i en induktionsmotor utsätts för en balanserad trefasspänning från nätet induceras ett magnetfält i luftspalten mellan rotorn och statorn. Denna har en konstant amplitud och roterar med den synkrona hastigheten. Vridmomentet i en induktionsmotor skapas genom interaktion mellan magnetfältet i luftspalten och strömmarna i rotorn. Om rotorn roterar med synkron hastighet induceras ingen spänning i rotorn, men om hastigheten skiljer sig finns det så kallad "slip", mellan den synkrona hastigheten och rotorns vinkelhastighet.

Denna eftersläpning hos rotorn innebär att magnetfältet i luftgapet roterar med sliphastigheten i förhållande till rotorn. Detta gör att en spänning induceras i rotorn, vilken i sin tur ger upphov till strömmar eftersom rotorlindningarna är kortslutna. Strömmen inducerar ett magnetfält som roterar med sliphastigheten i förhållande till rotorn och således med den synkrona hastigheten i förhållande till statorn. Interaktion mellan det magnetiska fältet i luftgapet och magnetfältet som skapas av rotorströmmarna resulterar i ett elektromagnetiskt vridmoment.

6.5.2 Frekvensomvandling

Det vanligaste sättet att variera effektuttaget i en induktionsmotor är frekvensomvandling, vilket innebär att statorfrekvensen f varieras. Om slipen hålls liten innebär det även att rotorfrekvensen varieras. Samtidigt hålls magnetfältet i luftspalten konstant genom att spänningen över statorn varieras proportionellt med f . I en frekvensomvandlare likriktas först spänningen, för att sedan växelriktas med exempelvis pulsbreddsmodulering till önskad frekvens och amplitud (Mohan, Undeland & Robbins, 2003).

Frekvensen kan varieras både under och över motorns märkfrekvens. Ofta kan induktionsmotorer, tack vare sin robusta konstruktion, köras i upp till dubbla märkfrekvensen utan mekaniska problem (Mohan, Undeland & Robbins, 2003).

7 Metod för laboratieförsök

7.1 Labbuppställning

Laboratieförsöken utfördes på Institutionen för mikrobiologi på SLU i Uppsala. Labbuppställningen visas i Figur 3. De två provrötkamrarna, GC1 och GC2, hade en aktiv rötkammarvolym på 5 l och var utrustade med automatisk temperaturreglering och omrörning. Temperaturen ställdes in till 52°C och omrörningen till 90 varv/min. Ympen till laborationsförsöket hämtades den 20/8-2013 från Rötkammare 2 på biogasanläggningen Kungsängens gård.



Figur 3. De två labbreaktorerna, GC1 till vänster och GC2 till höger. Foto: Johanna Grim.

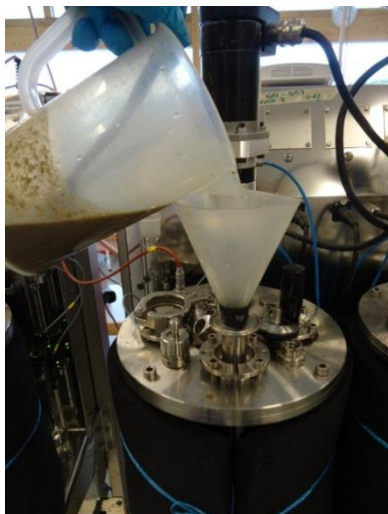
7.2 Substrat

Substrat hämtades den 20/8 från den sista bufferttanken innan hygieniseringen. Substratet bestod således av dispergerat organiskt hushållsavfall, livsmedelsavfall och slakteriavfall. Fem hinkar togs ut varav fyra frystes ned i väntan på användning. Det upptinade substratet förvarades i kylskåp. Analys av torrsubstans (TS) och organiskt material (VS) gjordes för att bestämma matningsvolym. Järnklorid berikad med spårämnen, Kemira BDP-865, tillsattes

till substratet. Det är samma typ som används på Kungsängens gård. Mängden järnklorid beräknades utifrån doseringen på anläggningen, som är ca 2,5 l/m³ (Malmros, pers. medd., 2013). Den första doseringen gjordes den 3 september och därefter vid upptining av substrat.

Reaktorerna matades en gång per dag, sex dagar per vecka. På det sättet sköttes alla reaktorer på SLU:s biogaslabb. Alla reaktorer matades antingen lördag eller söndag av auktoriserad personal, som då även matade reaktorerna som ingick i detta projekt. Därför räknades en veckas belastning om för att matas in på sex dagar i stället för sju. Den organiska belastningen för labbreaktorerna bestämdes till 3,5 g VS/(l, dag), eftersom det var den ungefärliga belastningen på Kungsängens gård (Malmros, pers. medd., 2013). Detta gav tillsammans med TS- och VS-analysen samt sex dagars matning per vecka en daglig inmatning av 125 g substrat i varje rötchammare. Till en början tillsattes 100 ml vatten men för att uppehållstiden skulle bli 30 dagar minskades mängden till 42 ml från och med den 28/8.

Både GC1 och GC2 matades till en början med opastöriserat material. Efter två veckors drift bedömdes gasproduktionen vara likvärdig och stabil i båda rötchamrarna, och GC2 började den 4/9 matas med pastöriserat material. Matning från toppen av reaktorerna visas i Figur 4.



Figur 4. Matning. Substratet leds via ett rör till rötchammarinnehållet.

Foto: Johanna Grim.

7.3 Pastörisering

Pastöriseringen av substrat till GC2 utfördes måndag-fredag med hjälp av ett värmeskåp på Uppsala Vatten och Avfall AB:s vattenlaboratorium. Uppställningen visas i Figur 5.

Substratet som skulle pastöriseras vägdes upp i en e-kolv och en temperaturgivare placerades i denna. E-kolven placerades i ett vattenbad som var 82-84°C och försett med lock. Under uppvärmningsperioden togs e-kolven ut flera gånger och skakades om för att temperaturen skulle utjämnas. När temperaturen var över 70°C fick substratet stå i vattenbadet för i en timme. Ibland fortsatte temperaturen att stiga över 70°C och då tillsattes kallvatten i vattenbadet för att temperaturen skulle stabiliseras. Pastöriseringstemperaturen varierade mellan 71°C och 78°C, men var för det mesta runt 72-74°C. På fredagarna

pastöriserades dubbel mängd för att möjliggöra matning under helgen. Detta krävde ca 88°C i vattenbadet. Det pastöriserade substratet förvarades i kylskåp innan helgmatningen.



Figur 5. E-kolv med substrat placerad i vattenbad i värmeskåp. Termometer nerstucken i substratet. Vid pastöriseringen sattes ett lock på kastrullen. Foto: Johanna Grim.

7.4 Mätning av processparametrar

Labbreaktorerna var utrustade med gasflödesmätare och flödet loggades.

Biogasproduktionen lästes av i samband med matning. All gas samlades även upp i en påse och volymen i denna bestämdes dagligen med hjälp av en volymflödesmätare av modell Ritter TG05/5. Denna mätning användes för att kalibrera den automatiska flödesmätningen.

Koldioxidhalten i biogasen bestämdes med hjälp av en sackarometer i samband med matning. 5 ml biogas togs ut ur reaktorn och sprutades in i sackarometern som var fylld med lut (7 M NaOH), se Figur 6. Eftersom koldioxiden löste sig i vätskan och metanet och övriga spärgaser bildade en gasbubbla kunde koldioxidhalten läsas av från skalan på röret. Koldioxidhalten användes för övervakning av processen.



Figur 6. Tillsats av biogas i sackarometern. Foto: Johanna Grim

Metanhalten mättes med gaskromatografi under två perioder (3-10/10 och 2-6/12). Gasprover togs ut från varje reaktor före matning varje dag under en vecka. Ett medelvärde med standardavvikelse beräknades och användes för att beräkna energiinnehållet i gasen under hela labbperioden. Den producerade mängden biogas räknades om till normalkubikmeter och gasens energimängd beräknades enligt avsnitt 6.3. Den genomsnittliga energiproduktionen sattes sedan i relation till tillförd mängd organiskt material och ett energiutbyte (kWh/kg VS) erhöles.

pH i rötktammarinnehållet mättes varje vecka. Ett prov togs ut före matning från varje reaktor och mätningen utfördes med en kalibrerad pH-mätare av modellen Jenway 3510. I samband med pH-mätning togs även prov ut för analys av fettsyror. Metoden finns beskriven i Bilaga A – Labbresultat.

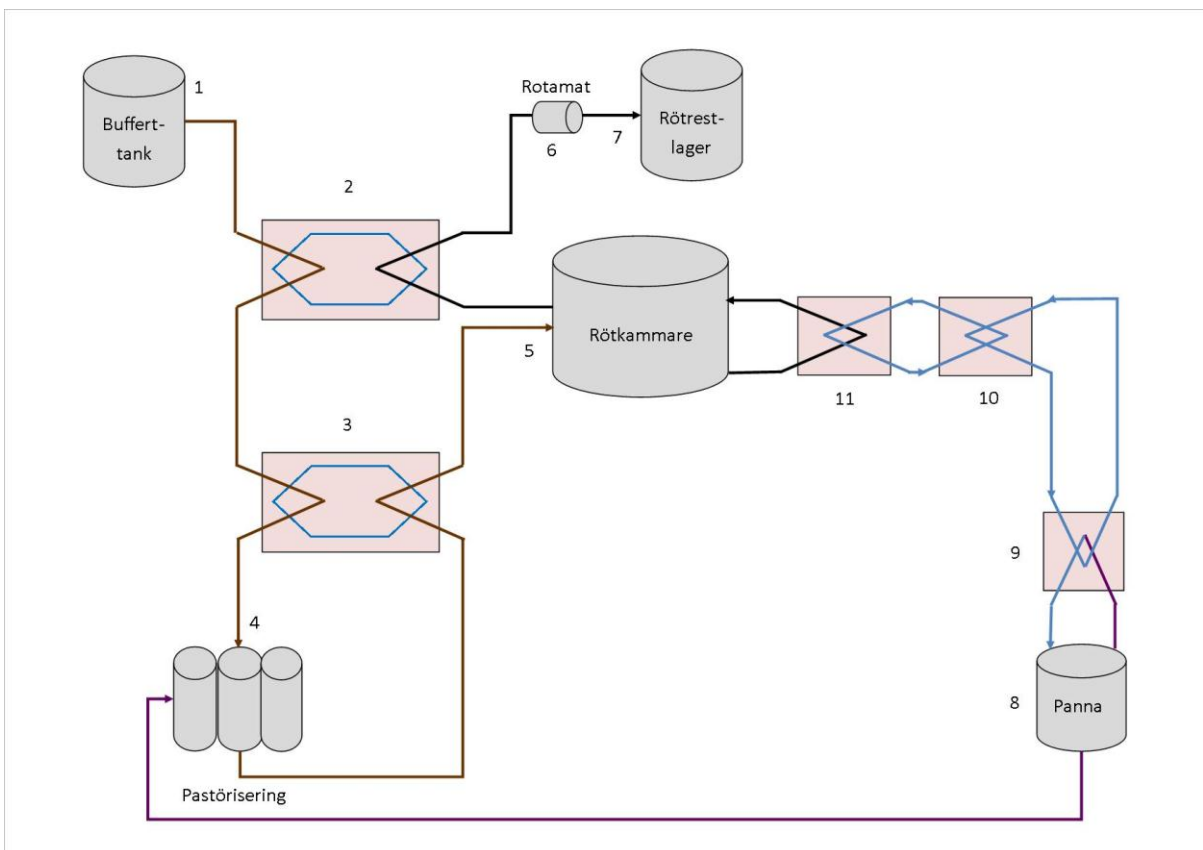
8 Metod för energikartläggning – pastörisering

Nedan beskrivs metoden som använts för att ta fram energiförbrukningen hos det hygieniseringssystem som används på anläggningen idag, pastörisering. Inledningsvis beskrivs processen och värmesystemet, och därefter beskrivs tillvägagångssättet för att kartlägga energiförbrukningen.

8.1 Processbeskrivning

Hygieniseringen på biogasanläggningen Kungsängens gård beskrivs i Figur 7. Substratet pumpas från en bufferttank (1) till de tre parallella pastöriseringskärlen (4) via två värmeväxlare. I det första steget (2) värmeväxlas substratet mot utgående rötrest som pumpas till rötrestlagret (7). På vägen silas rötresten i rotamaten (6). I det andra steget (3) överförs värme från det nypastöriserade materialet innan det pumpas in i rötktammaren (5). Detta sker både för att minska uppvärmningsbehovet på inkommande substrat, men även för att inte övervärma rötktammarna. För att värmeväxlingen ska fungera sker alltså in- och utmatning samtidigt. Båda värmeväxlarna är motströms tubvärmeväxlare, där en vattenkrets överför värmen från den varma till den kalla sidan. Figuren är förenklad då det finns två rötktammare.

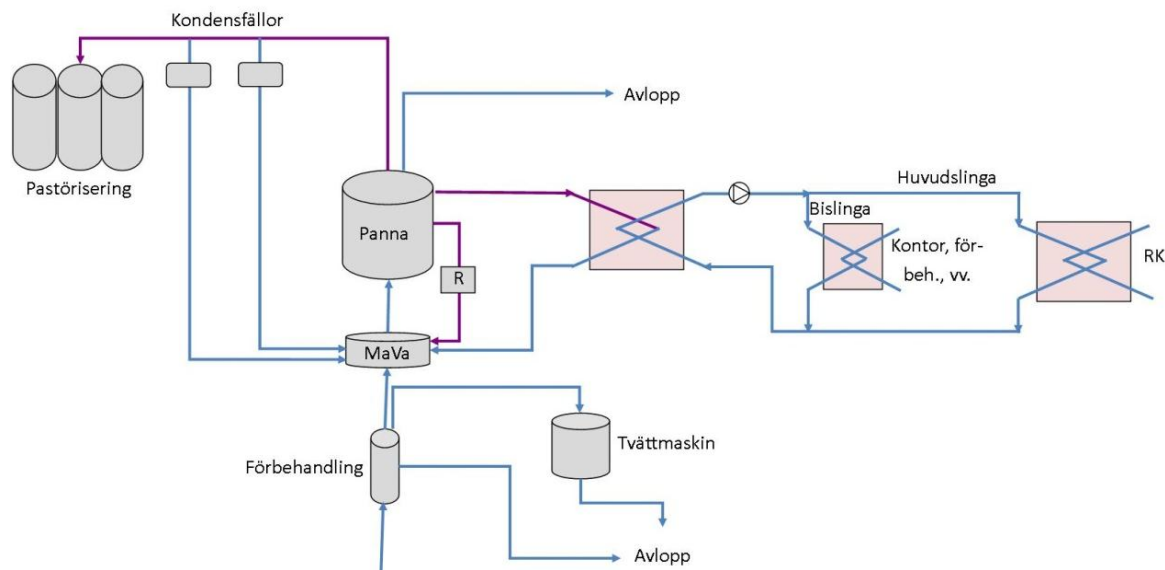
Hela anläggningens värmebehov för pastörisering, uppvärmning av lokaler och rötktammare samt produktion av varmvatten tillgodoses av en ångpanna (8) som eldas med biogas eller olja. I pastöriseringen värms substratet upp genom att ånga tillsätts direkt i tankarna via en ångledning. För det övriga värmebehovet används hetvatten. I pannrummet värmväxlas ånga mot vatten (9) som leds ut i hela anläggningen. En del av detta används för att kompensera för värmeförluster i rötktammarna och hålla temperaturen stabilt på 52°C. Denna varmhållning sker via två värmeväxlingssteg. Hetvattnet från pannan värmväxlas först mot en vattenkrets (10), som i sin tur växlas mot rötktammarinnehållet i cirkulationskretsen (11). Även här är figuren förenklad, då hetvattnet inte bara går till rötktammarna utan även används för varmvatten och för att värma upp hela anläggningen.



Figur 7. Processchema. Bruna linjer – substrat. Svarta linjer – rötkammarinnehåll/rötrest. Blå linjer – vatten. Lila linjer – ånga. 1 – Bufferttank. 2 – Värmeväxlare inkommande hygienisering/utgående rötrest. 3 – Värmeväxlare inkommande hygienisering/inkommande rötkammare. 4 – Pastöriseringstankar. 5 – Rötkammare. 6 – Rotamat. 7 – Rötrestlager. 8 – Panna. 9 – Värmeväxlare – ånga/hetvatten. 10 – Värmeväxlare hetvatten/vattenkrets. 11 – Värmeväxlare vattenkrets/cirkulation rötkammare.

Ångpannan och värmesystemet visas mer detaljerat i Figur 8. Pannan producerar ånga vid 5 bars tryck som vid behov leds till pastöriseringen. På vägen finns två kondensfällor från vilka kondensat leds tillbaka till matarvattentanken. Ånga leds även till en ång/vattenvärmeväxlare som värmer resten av värmesystemet. Returen på pannsidan leds till matarvattentanken. På andra sidan värmeväxlaren delas flödet upp i en huvudslinga och en bislinga. En pump driver flödet till båda. Huvudslingan värmer stora delar av anläggningen via fläktar där ventilationsluften värms vid behov. Längst ut på kretsen värms rötkammarcirkulationen via en vattenkrets, se Figur 7. Bislingan värmer via en värmeväxlare varmvattnet, personalutrymmena samt anläggningens förbehandlingslokaler. Det finns även en ångledning direkt från pannan till matarvattentanken. Matarvattentanken ska hålla 80°C och ånga tillsätts när temperaturen är för låg.

Matarvattentanken förses med nytt vatten som passerat en förbehandling. Detta kompenserar för massförlusterna i systemet, vilka utgörs av ångflödet till pastöriseringen och vatten som går till olika avlopp. Dels sker ångurblåsningar för att rengöra pannan och dels förbrukar förbehandlingen vatten då den regenereras. Efter förbehandlingen har även en tvättmaskin kopplats på.



Figur 8. Pannan och värmesystemet. Lila linjer – ånga. Blå linjer – vatten. MaVa – matarvattentank. R – reglerventil. Bislinga – värmer varmvatten, personalutrymmen och förbehandlingslinjen. Huvudslinga – värmer resten av anläggningen via fläktar samt rötkammare.

Temperaturen i matarvattentanken mättes innan projektstarten, samt flödet av rent vatten in till förbehandlingen och flödet av behandlat vatten till matarvattentanken. Dessa loggades dock inte. Historiska data fanns att tillgå för flödet av rent vatten eftersom mätaren läses av varje månad. Samtliga andra flöden och temperaturer var okända. Det totala flödet av biogas till pannan mättes och loggades men det var okänt hur stor andel som användes till pastöriseringen respektive hetvattenkretsen.

8.2 Energikartläggning

Värmebehovet för den studerade delen av processen kan delas upp i två delar – ångbehov för pastöriseringen och värmebehov för varmhållning av rötkamrarna. Eftersom energin kom från pannan kan behovet kopplas till en förbrukning av biogas via pannans verkningsgrad. För att kartlägga energibehovet betraktades systemet som en helhet. Värmeförluster förekommer i värmeväxlare, pastöriseringskärl, rötkammare och rörledningar, men dessa utreddes inte explicit. I stället kartlades den ingående energin i systemet. Värmeåtervinningen i värmeväxlarna före pastöriseringen togs med indirekt, då den påverkar temperaturen på det inkommande substratet.

8.2.1 Energibehov för varmhållning av rötkamrarna

För att kartlägga värmebehovet för varmhållning av rötkamrarna monterades temperatur- och flödesgivare på hetvattenkretsen vid rötkammarcirkulationen. Givarna sattes på hetvattnets in- och utgång, se värmeväxlare 10 i Figur 7. Den avgivna värmen inkluderade således förluster i rötkammaren samt i värmeväxlarna som växlar rötkammarinnehåll mot vatten och vatten mot hetvatten (10 och 11 i Figur 7). Installationen visas i Figur 9.



Figur 9. Värmeväxlaren mellan hetvattenkretsen och vattenkretsen. Temperaturgivare installerade på hetvattnets in- och utgång och flödesmätare på ingången till värmeväxlaren. Foto: Johanna Grim.

För att koppla den uppmätta energimängden till biogasförbrukning uppskattades pannans verkningsgrad och energiverkningsgraden i ång/hetvattenvärmeväxlaren (9 i Figur 7). Pannans förbränningsverkningsgrad togs fram genom mätning av rökgasparametrar med instrumentet Testo 330-2 LL från Nordtec Instrument AB. Här ingår förluster som uppkommer på grund av oförbränt bränsle samt värmeavgång med rökgaserna. Strålningsförlusterna från pannan försumrades. Värmeväxlarens verkningsgrad uppskattades efter kontakt med tillverkaren.

Energiförbrukningen för varmhållning av rötkamrarna registrerades dagligen. Den specifika energiförbrukningen per inmatad mängd VS beräknades enligt ekvation 13 med hjälp av anläggningens mottagningsdata samt genomsnittlig TS- och VS-halt under perioden. Givarna installerades den 26/9. Det var dock problem med loggningen fram till den 11/10, vilket ledde till att värdena för den första perioden är osäkra och inte tas med i resultatet. Loggningen fungerade från den 12/10. Till en början användes endast data för RK2 eftersom RK1 fylldes på och värmdes upp efter en tömning. Efter den 28/10 användes data för båda rötkamrarna.

$$e_{RK} = \frac{E_{RK}}{V_{sub} \cdot \overline{TS} \cdot \overline{VS} \cdot 1000 \cdot \eta_{vwx} \cdot \eta_{panna}} \quad (13)$$

där

e_{RK} = specifik energiförbrukning för varmhållning [kWh/kg VS]

E_{RK} = uppmätt varmhållningsbehov [kWh]

V_{sub} = inmatad mängd substrat [m³]

\overline{TS} = genomsnittlig TS-halt

\overline{VS} = genomsnittlig VS-halt

η_{panna} = pannans verkningsgrad

η_{vwx} = ång/vattenvärmeväxlarens verkningsgrad.

8.2.2 Energibehov för pastörisering

För att erhålla energibehovet för pastöriseringen behövde mängden ånga som levereras till pastöriseringstankarna, alternativt energimängden som krävs för att producera ångan, kartläggas. Den första strategin var att mäta flöde, temperatur och tryck i ångledningen. Detta visade sig dock omöjligt då en sådan mätare var alltför dyr. I stället utreddes möjligheten att beräkna erforderad energimängd för att tillverka ångan. Om flödena till avloppen kunde uppskattas skulle resterande massförlust i systemet utgöras av ånga som tillförts pastöriseringstankarna. Det skulle då vara möjligt att göra en teoretisk beräkning av hur mycket energi som krävts för att värma och förånga detta vatten. Man skulle då behöva veta från vilken temperatur vattnet värms upp. Det visade sig vara svårt då matarvattentanken värmdes upp av kondens, returen från värmeväxlaren och det direkta ångflödet, se Figur 8. Värmen är nyttig både för hygieniseringen och för uppvärmningssystemet och det skulle då ha varit nödvändigt med någon slags allokering av hur mycket av uppvärmningen av matarvattnet som räknas till respektive system. Eftersom så många flöden och temperaturer var okända valdes i stället en tredje strategi.

Som alternativ till att beräkna energibehovet för ångproduktionen mättes den totala mängden energi som levererats till värmesystemet. Temperaturgivare och en flödesmätare monterades på vattensidans in- och utlopp på ång/vattenvärmeväxlaren (se Figur 8 eller nr 9 i Figur 7). Därav kunde den dagliga energiåtgången för uppvärmning och varmvatten mätas. Med hjälp av verkningsgraden för ång/vattenvärmeväxlaren samt pannverkningsgraden som togs fram enligt kapitel 8.1.3 kunde energiförbrukningen för hela värmesystemet (uppvärmning av rötkammare, anläggning, personalutrymmen samt varmvatten) beräknas. Energibehovet till pastöriseringen utgjordes sedan av det som blir kvar av den totala energiförbrukningen när värmesystemets behov har räknats bort. Den totala energiförbrukningen togs fram via anläggningens data över daglig biogastillförsel till pannan, den genomsnittliga metanhalten under perioden samt metans värmevärde, se avsnitt 6.3. Beräkningarna beskrivs i ekvation 14.

$$E_{past} = E_{tot} - \frac{E_{värmesystem}}{\eta_{panna} \cdot \eta_{vwx}} \quad (14)$$

där

E_{past} = energi för pastörisering [kWh]

E_{tot} = tillförd energi till pannan [kWh]

$E_{värmesystem}$ = energi till hela värmesystemet (uppmätt) [kWh].

Mätningen av hela anläggningens energibehov fanns installerad från den 26/10. Under perioden 26/9-26/10 approximerades energibehovet med rötkamrarnas sammanlagda uppvärmningsbehov. Detta bör vara rimligt eftersom det var relativt varmt och det inte behövdes så mycket uppvärmning av lokalerna. Dessutom var inte personalutrymmena i bruk på grund av renovering, så ingen värme förbrukades där. Att rötkammarvärmningen var osäker 26/9-11/10 ansågs inte påverka slutresultatet i större utsträckning eftersom denna utgör en liten del av den totala energiförbrukningen. Därför användes även datan från denna

period. Energiförbehovet sattes sedan i relation till inmatad mängd organiskt material enligt ekvation 15.

$$e_{past} = \frac{E_{past}}{V_{sub} \cdot TS \cdot VS \cdot 1000} \quad (15)$$

Det visade sig under projektets gång att mätningen av biogasflödet till pannan inte var tillförlitlig. Det fanns två felkällor som gjorde att flödet överskattades. Dessa samt hur en korrigeringsfaktor togs fram beskrivs i Bilaga C – Korrigering av gasflödesmätning.

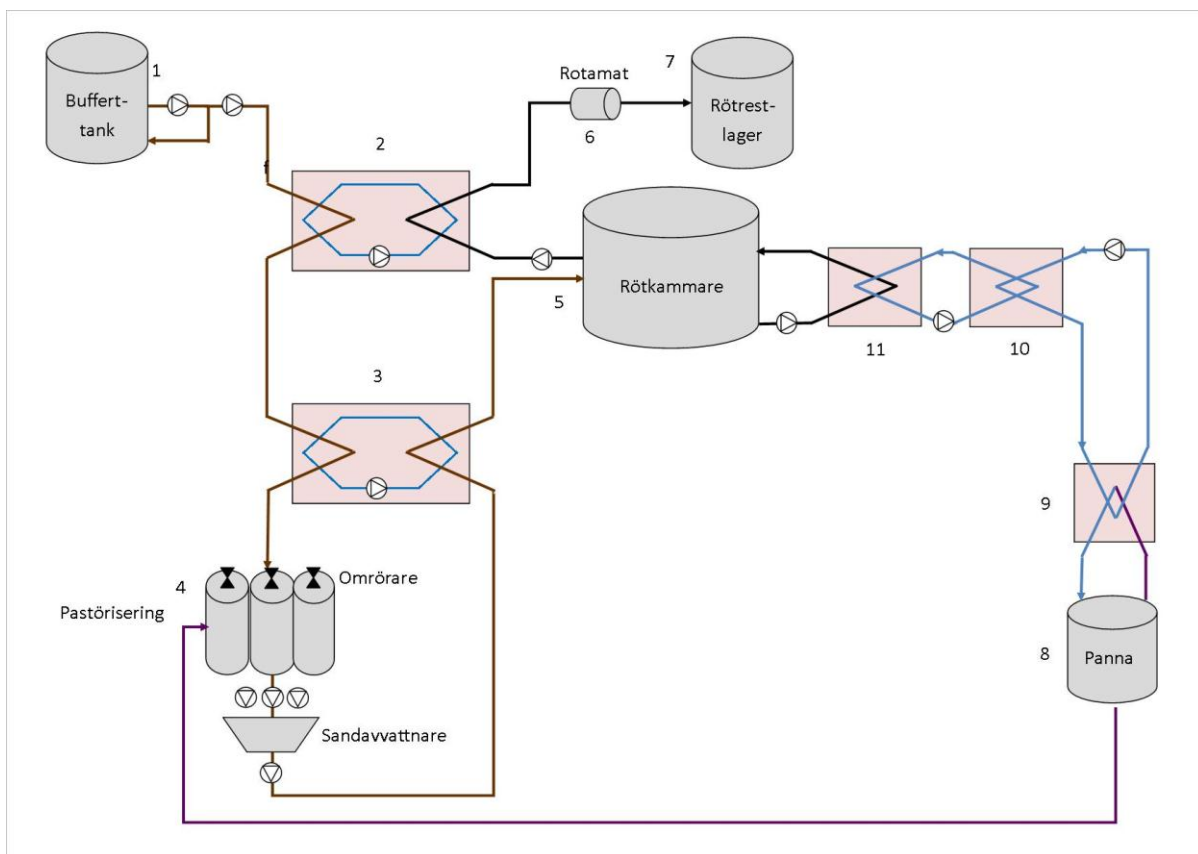
För att validera resultatet gjordes två enkla överslagsberäkning av ångbehovet. I den första beräknades energimängd för uppvärmning och förångning av det förbrukade vattnet i systemet. Mängden förbrukat matarvatten mättes genom daglig avläsning av vattenmätaren på inloppet till matarvattentanken. Bottenurbålsningen försumrades och allt vatten antogs omvandlas till ånga för pastöriseringen. I beräkningen av erforderad mängd energi för omvandlingen antogs att mättad ånga vid fem bars tryck bildades från vatten med temperaturen 80°C. Kombinerat med pannans förbränningsverkningsgrad gav detta förbrukat mängd gas per dygn. Detta sattes i relation till behandlad mängd substrat, och kunde jämföras med behovet som beräknats enligt ovan.

I den andra valideringen beräknades uppvärmningsbehovet i pastöriseringstankarna. Beräkningen utfördes med hjälp av de genomsnittliga temperaturerna på inkommande och pastöriserat substrat under 2012 samt substratets specifika värmekapacitet. Verkningsgraden i värmeöverföringen antogs vara 100 %, vilket är rimligt eftersom ångan blandas direkt med substratet. Kombinerat med pannans verkningsgrad gav detta gasbehovet.

8.2.3 Elbehov

För beräkning av elbehovet var systemgränser tvungna att definieras. Pumpar och omrörare som ansågs vara direkt kopplade till hygieniseringen och vars drift kunde antas förändras med ett alternativt hygieniseringssystem inkluderades. Processchemat i Figur 10 illustrerar detta.

Pumpar in till och ut från pastöriseringen togs med, liksom pumpar på vattenkretsarna i värmeväxlarna. Omrörningen i hygieniseringstankarna inkluderades, men inte omrörningen i någon av de andra tankarna eftersom den inte påverkas av hygieniseringssystemet. Urpumpningen ur rötammaren togs med eftersom materialet värmesväxlas, liksom rotamaten. Pumparna på rötkammarens cirkulationskrets och värmesystemet inkluderades eftersom drifttiden och dimensioneringen kunde förändras med ett förändrat hygieniseringssystem och därmed större värmebehov i rötkamrarna. Cirkulationspumpningen på bufferttanken inkluderades eftersom den är nödvändig för inpumpning till pastöriseringstankarna och för att den skulle kunna tänkas vara en del i ett av de alternativa systemen, där man har en värmeväxling mellan bufferttanken och rötrestlagret, se avsnitt 9.1.

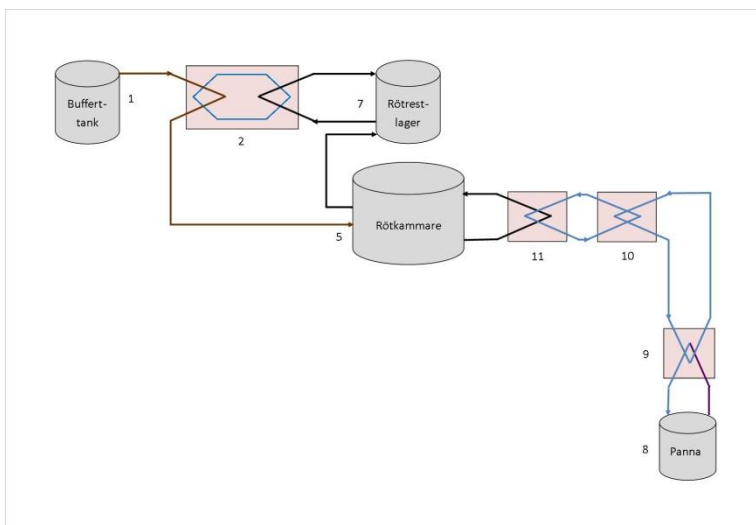


Figur 10. Processchema med relevanta elförbrukare.

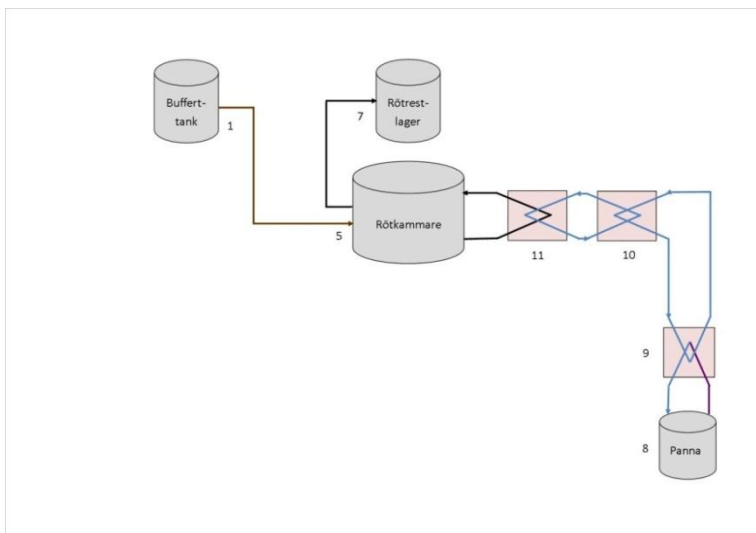
Elförbrukningen för de olika komponenterna beräknades med hjälp av drifttider och uppskattad genomsnittlig effekt. Effekten togs fram på olika sätt beroende på hur komponenterna styrdes. Pumparna tillhörande värmesystemet, cirkulationspumpen på Rörkammare 2, rotamaten samt två av omrörarna var inte frekvensstyrda så elförbrukningen uppskattades utifrån installerad effekt för respektive komponent. Resten av komponenterna var frekvensstyrda, somliga med en nyare modell av frekvensomformare. På dessa kunde total drifttid och förbrukad energi sedan installation avläsas. Dessa avlästes en gång i veckan för att se hur förbrukningen varierade, och ett medelvärde för hela perioden användes sedan i beräkningarna. Pumparna och omrörarna som hade äldre frekvensomformare hade inte denna möjlighet. Där undersöktes i stället vilken frekvens komponenterna brukade arbeta vid, och sedan togs en effektförbrukning fram i kontakt med tillverkare.

Drifttiden för varje komponent avlästes en gång per vecka och energiförbrukningen kunde därmed beräknas. Sedan jämfördes elåtgången E_{el} med inmatad mängd substrat enligt ekvation 16.

$$e_{el} = \frac{E_{el}}{V_{sub} \cdot \overline{TS} \cdot \overline{VS} \cdot 1000} \quad (16)$$



Figur 13. Alternativt system nr 3. Värmeväxling mellan inmatning och rörestlagret.



Figur 14. Alternativt system nr 4. Ingen värmeväxling.

Inledningsvis kartlades alla systemen översiktligt med avseende på vilken utrustning i form av värmeväxlare och pumpar som skulle krävas, dimensionering av dessa samt vilka ungefärliga flöden och temperaturer som skulle bli aktuella. Dimensioneringen gjordes utifrån följande villkor:

1. Matningscykel 24 h
2. Stopp för in- och urpumpning ur varje rötkammare under 10 h/dygn
3. Så jämn gasproduktion som möjligt
4. Inmatat material får inte påverka rötkammartemperaturen alltför mycket
5. Daglig inmatning 80 m³ till varje rötkammare

Därefter valdes ett alternativ, och värme- och elbehovet uppskattades. Valet gjordes utifrån följande kriterier.

1. Rimligt med avseende på tekniska möjligheter (plats, dimensionering av komponenter, hur mycket av befintlig utrustning som kan användas).
2. Rimligt med avseende på inmatningstemperatur (matning får inte påverka temperaturen i rötkammaren alltför mycket).
3. Rimligt med avseende på inmatningsflöde och -tid.

9.2 Uppskattning av värmebehov

Energibehovet beräknades från temperaturdifferensen mellan substrat (efter eventuell värmeväxling) och rötkammartemperatur samt substratets specifika värmekapacitet enligt ekvation 4 och 5 i avsnitt 6.4.1. Hur värmen skulle tillföras undersöktes därefter. Till detta lades energibehovet för varmhållning av rötkamrarna, vilket mätts enligt kapitel 8.2.1.

9.3 Uppskattning av elbehov

För att beräkna elbehovet användes data från energikartläggningen av det befintliga systemet med vissa förändringar. I de fall effektförbrukningen kunde antas bli samma användes denna, annars modifierades effekten. Sedan uppskattades vilka drifttider de olika enheterna skulle få baserat på dimensioneringen av processen. De enheter som inte fanns med vid integrerad termofil hygienisering togs bort. För de enheter som lades till uppskattades både effektförbrukning och drifttid.

10 Metod för jämförelse av hygieniseringssystemen

Den specifika energiproduktionen (kWh/kg VS) från båda labbreaktorerna analyserades och en kvot mellan produktionen från opastöriserat och pastöriserat material beräknades enligt ekvation 17.

$$k = \frac{e_{biogas,lab,opast.}}{e_{biogas,lab,past.}} \quad (17)$$

För energiutbytet hos det nuvarande systemet med pastörisering, $e_{biogas,past}$ (kWh/kg VS), användes anläggningsdata för gasproduktion, metanhalt, inmatning, TS och VS från energikartläggningsperioden. För att beräkna energiutbytet för ett system med integrerad termofil hygienisering, $e_{biogas,ith}$, användes ekvation 18.

$$e_{biogas,ith} = k \cdot e_{biogas,past} \quad (18)$$

Energikartläggningen och dimensioneringen bidrog med genomsnittlig förbrukad mängd värme-, ångenergi och elenergi per tillsatt organiskt material (kWh/kg VS) för pastörisering respektive integrerad termofil hygienisering.

För att kunna jämföra pastörisering med integrerad termofil hygienisering beräknades det specifika värme- och elbehovet som en kvot mellan erforderad mängd el eller värme och ånga samt producerad mängd biogasenergi från en viss mängd substrat. Se ekvation 19 och 20.

$$e_{v\&\ddot{a}} = \frac{q_{v\&\ddot{a}}}{e_{biogas,past/ith}} \cdot 100\% \quad (19)$$

$$e_{el} = \frac{E_{el}}{e_{biogas,past/ith}} \cdot 100\% \quad (20)$$

där

$e_{v\&\ddot{a}}$ = specifikt värme- och ångbehov för respektive system (%)

$q_{v\&\ddot{a}}$ = värme- och ångbehov [kWh/kg VS]. För pastöriseringssystemet $e_{past} + e_{RK}$

$e_{biogas,past/ith}$ = energiproduktion biogas från respektive system [kWh/kg VS]

e_{el} = specifikt elbehov för respektive system (%)

E_{el} = elbehov [kWh/kg VS].

11 Resultat från laboratorieförsök

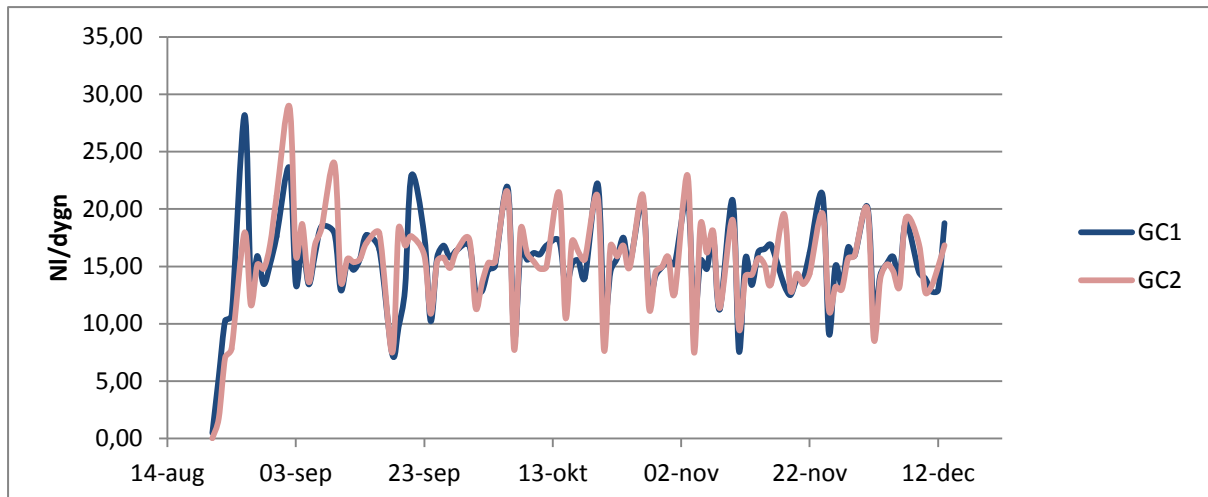
11.1 Biogasproduktion

Den dagliga biogasproduktionen korrigerad för tryck och temperatur visas i Figur 15.

Loggning av gasflödet för den sista månadens produktion visas i Bilaga A – Labbresultat.

Produktionen varierade efter en uppstartsperiod mellan 7 och 29 NI/dygn. Den uppmätta volymen var störst efter två dagars produktion på helgen och minst dygnet efter helgmatningen.

Resultaten från gaskromatografianalyserna kan ses i Bilaga A – Labbresultat. Medelvärdet från båda perioderna var 63,5 % för båda reaktorerna med en standardavvikelse på 2,3 procentenheter för GC1 och 2,2 procentenheter för GC2.



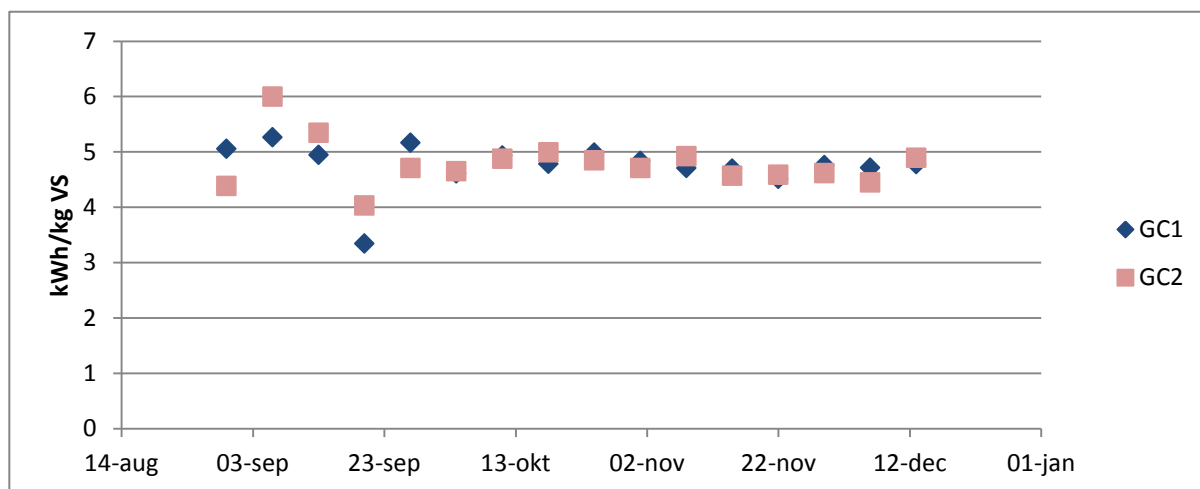
Figur 15. Normaliserad biogasproduktion från labbreaktorerna.

11.2 TS och VS

För bestämning av den organiska belastningen gjordes TS- och VS-prover på substratet i den första hinken den 20/8 och gav en TS-halt på 15,8 %. Ytterligare prov visade att TS- och VS-halterna varierade, se Bilaga A – Labbresultat. Vid beräkning av energiutbyte användes de första resultaten för TS och VS.

11.3 Energiutbyte

Veckomedelvärden av energiutbytet från reaktorerna visas i Figur 16. Det första låga värdet för GC2 berodde på gasläckage. Matningen av pastöriserat substrat till GC2 började den 4 september. Den höga produktionen från GC2 den 6 september berodde troligen på tidigare höga halter av fettsyror som bröts ner och gav en ökad gasproduktion. De låga värdena den 20 september berodde på ett strömavbrott. Temperaturen sjönk i reaktorerna och de matades därför inte dagen därpå. De tycks ha återhämtat sig då produktionen stabiliserades efteråt och energiutbytet var likvärdigt i båda reaktorerna. Energiutbytet varierade efter den 20 september mellan 4,5 och 5,2 kWh/kg VS med medel 4,79 kWh/kg VS för GC1 och 4,74 kWh/kg VS för GC2.



Figur 16. Veckomedelvärden av energiutbytet från labbreaktorerna.

11.4 pH och fettsyror

Resultaten från pH-mätningarna och fettsyreanalyserna kan ses i Bilaga A – Labbresultat. pH-värdet varierade mellan 7,8 och 8,1 med ett medel på 8,0 för båda reaktorerna. Efter inledningsvis relativt höga värden stabiliserade sig fettsyrahalterna på värden under 0,5 g/l i båda reaktorerna.

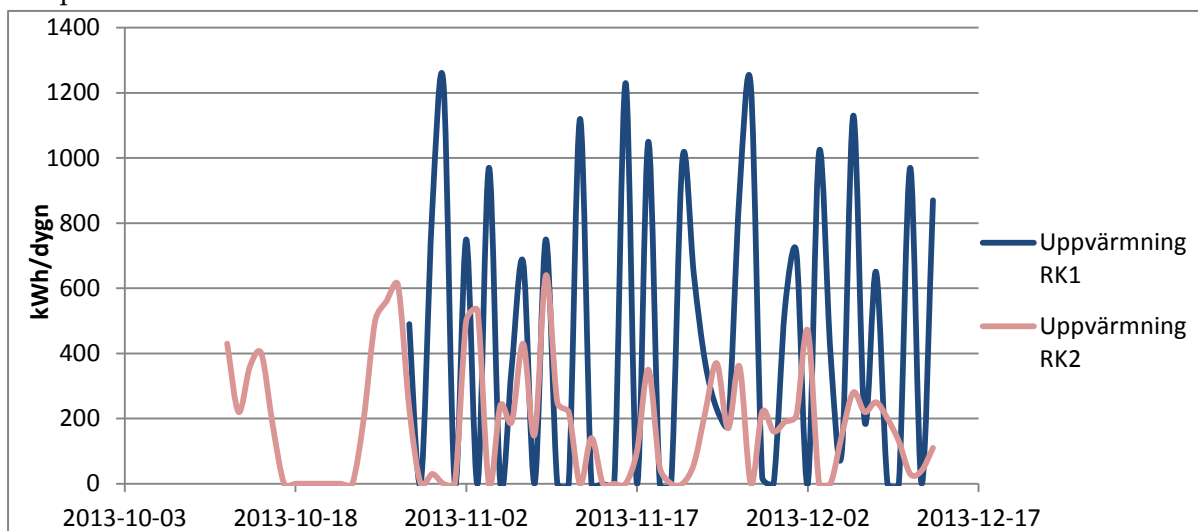
12 Energikartläggning av pastörisering

12.1 Verkningsgrader

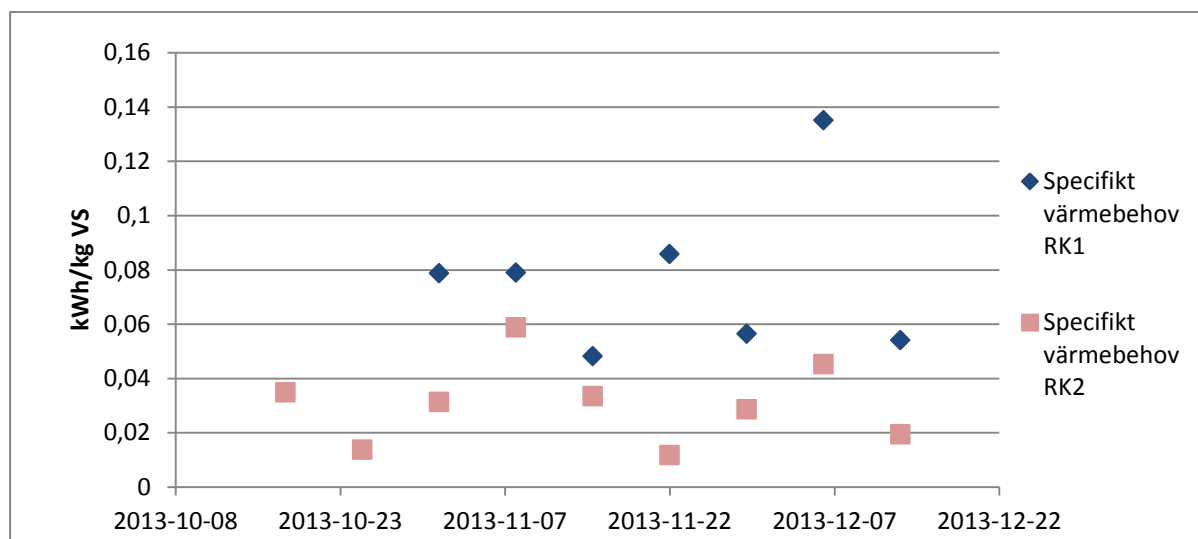
Pannans verkningsgrad mättes två gånger till 80,3 respektive 80,6 %. I beräkningarna användes medelvärdet 80,45 %. Verkningsgraden för ång/vatten-värmeväxlaren kunde inte tas fram av tillverkaren (Jonson, pers. medd., 2013). Förlusterna är dock små och sker främst i matarvattentanken. De beror på kondensattemperatur och hur tanken är isolerad och avluftad (Svensson, pers. medd., 2013). Eftersom osäkerheten var stor och förlusterna små sattes verkningsgraden till 100 %.

12.2 Energibehov för varmhållning av rötkammaren

Rötkamrarnas dagliga värmeförbrukning visas i Figur 17. Värmebehovet varierade stort, mellan 0 och 1230 kWh/dygn. Veckomedelvärden för den specifika energiförbrukningen visas i Figur 18. Här varierade energibehovet mellan 0,048-0,14 kWh/kg VS för RK1 och 0,012-0,059 kWh/kg VS för RK2. Medel var 0,077 kWh/kg VS för RK1 och 0,031 kWh/kg VS för RK2. Anledningen till det större behovet hos RK1 var att den var delvis oisolerad under mätperioden.



Figur 17. Varmhållning av rötkamrarna.

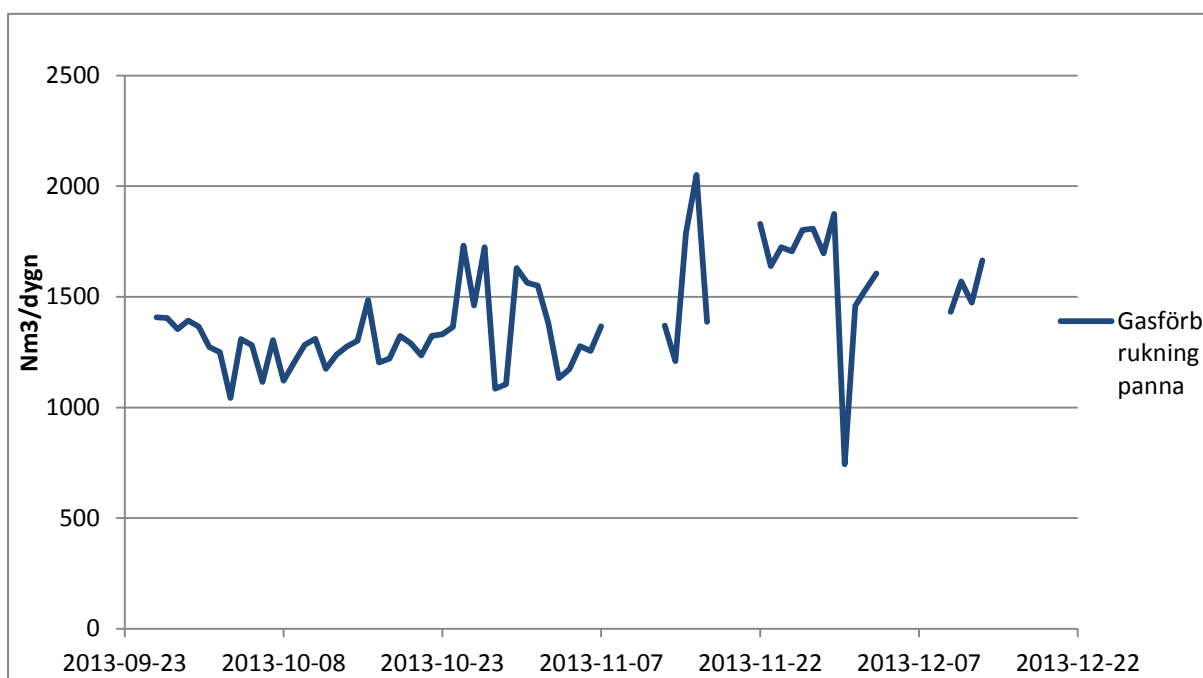


Figur 18. Specifikt värmebehov för rötkamrarna.

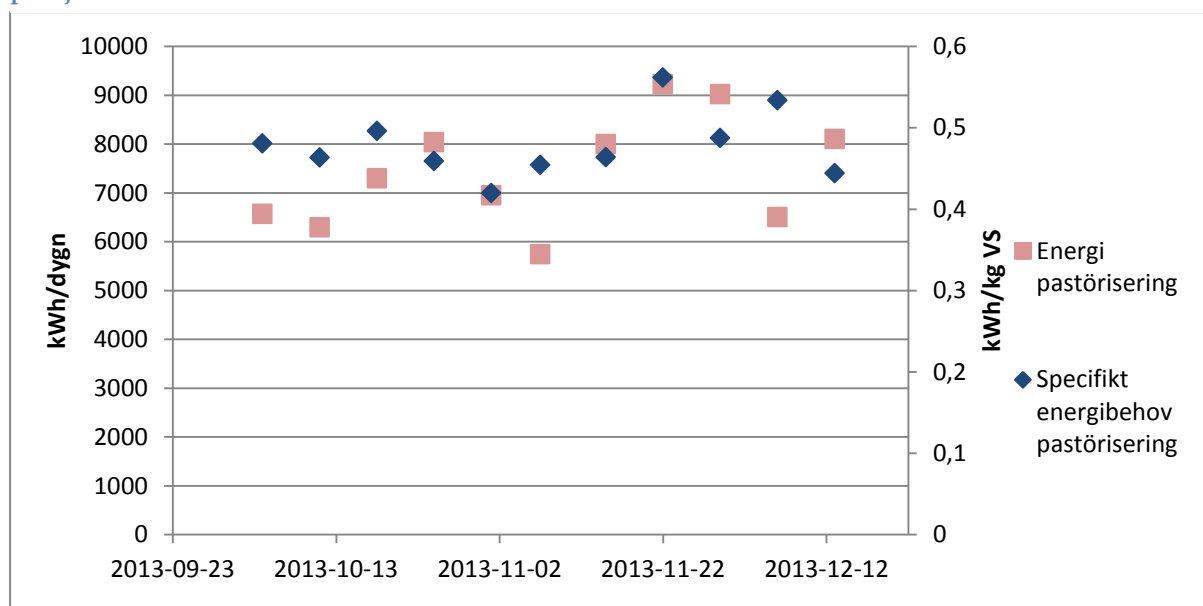
12.3 Energibehov för pastörisering

Pannans förbrukning av biogas varierade mellan 740 och 2050 Nm³/dygn och visas i Figur 19. Luckorna i dataserien beror på att pannan kördes på olja under dessa perioder.

Veckomedelvärden av pastöriseringens energibehov visas i Figur 20. Det totala energibehovet låg inom intervallet 5750-9220 kWh/dygn med ett medel på 7430 kWh/dygn. Det specifika energibehovet låg inom intervallet 0,42-0,56 kWh/kg VS med ett medel på 0,48 kWh/kg VS.



Figur 19. Pannans biogasförbrukning. Luckorna i dataserien beror på att pannan under dessa perioder kördes på olja.



Figur 20. Energiförbrukning för pastörisering (veckomedelvärden). På den primära y-axeln, röda markörer, visas energiförbrukningen i kWh/dygn, på den sekundära y-axeln, blå markörer, visas det specifika energibehovet i kWh/kg VS.

12.4 Validering av energibehov för pastörisering

12.4.1 Validering 1

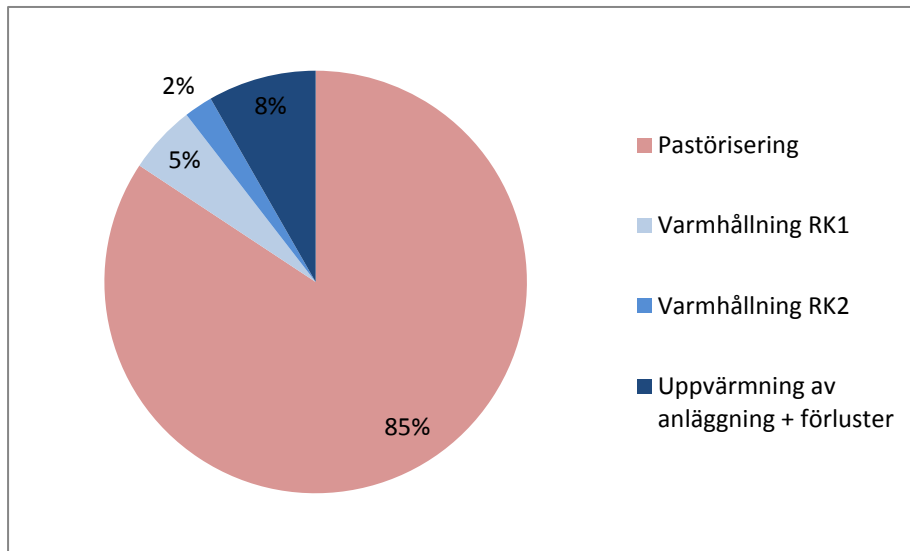
Mellan den 30/9 och den 13/12 förbrukades i genomsnitt 7,22 m³ vatten per dygn. Att värma upp och förångna vattnet från 80°C vid fem bars tryck motsvarar 2,72 GJ/m³. Satt i relation till inmatning krävdes 0,35 kWh/kg VS. Detta är i samma storleksordning men lägre än det uppmätta behovet, vilket är rimligt eftersom förluster och överhettning av ångan inte inkluderades.

12.4.2 Validering 2

Vid beräkning av det teoretiska energibehovet för att värma substratet till 73°C erhöles 0,31 kWh/kg VS. Även detta är lägre men i samma storleksordning som resultatet.

12.5 Fördelning av värmeförbrukning

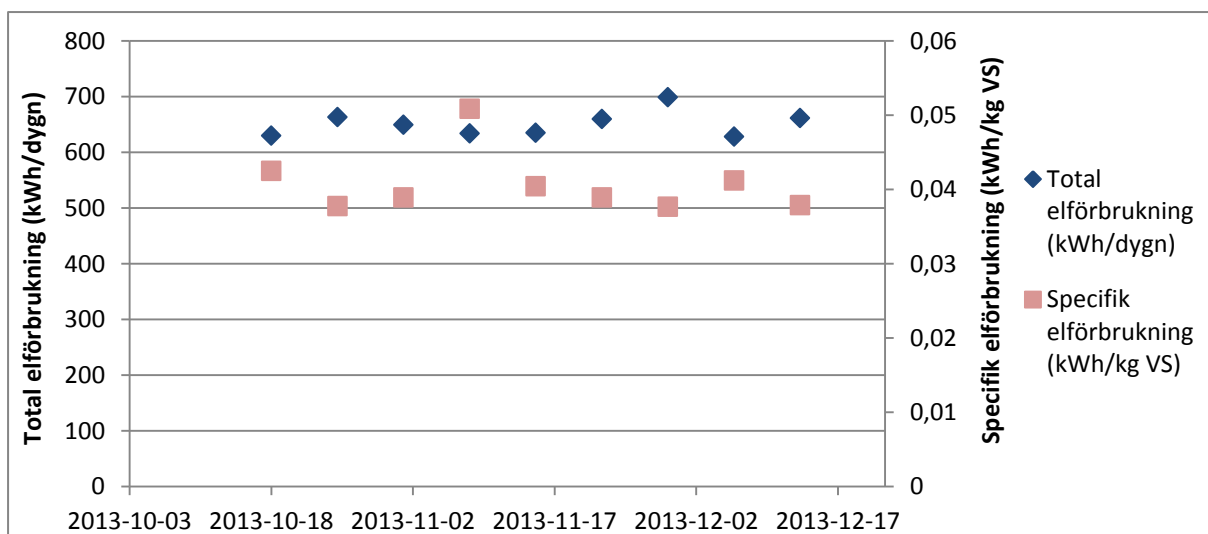
Den totala värmeförbrukningen var i genomsnitt 8700 kWh/dygn. Av det gick 7430 kWh/dygn till pastörisering, 438 till varmhållning av RK1, 180 till RK2 samt 693 till uppvärmning av anläggning samt förluster. Fördelningen visas i Figur 21.



Figur 21. Fördelning av energiförbrukning.

12.6 Elbehov

Resultatet av kartläggningen av effektförbrukningen och drifttiden hos pumpar och omrörare visas i Bilaga B – Elförbrukning pumpar och omrörare. Elförbrukningen under perioden (veckomedelvärden), både totalt per dygn och specifikt per inmatad mängd VS visas i Figur 22. Medel för hela perioden var 651 kWh/dygn respektive 0,041 kWh/kg VS.



Figur 22. Elförbrukningen under perioden. Total (kWh/dygn) och specifik (kWh/kg VS).

13 Dimensionering och energikartläggning av integrerad termofil hygienisering

13.1 Översiktlig dimensionering

Nedan beskrivs vilka parametrar som påverkade dimensioneringen utifrån kriterierna i kapitel 9.1 och hur de olika alternativen (se Figur 11-14) uppfyllde kriterierna.

En matningscykel på 24 timmar innebär att inmatning, hygienisering och utmatning ur båda rötkamrarna ska ske på ett dygn. Detta är fördelaktigt eftersom det förenklar övervakningen av gasproduktionen (man kan förvänta sig samma produktion varje dygn) och för att provtagning vid samma tid på dygnet medför samma tidpunkt i matningscykeln (Martinsson, pers. medd., 2013).

För att få jämn gasproduktion över dygnet bör rötkamrarna matas växelvis. Det är även fördelaktigt att ha så lång inmatningsperiod som möjligt, eftersom gasproduktionen då inte hinner avklinga innan matningen av den andra reaktorn startar och produktionen kommer igång. På biogasanläggningen i Borås har man exempelvis tio timmars inmatning, tio timmars hygienisering och fyra timmars utmatning (Martinsson, pers. medd., 2013).

Urpumpningskapaciteten blir avgörande för hur lång inmatningstid som är möjlig.

Rotamaten som används idag har en kapacitet på ca 8 m³/h, vilket ger tio timmars utmatningstid. Det finns en till rotamat tillgänglig och tillsammans skulle rotamaterna klara 20 m³/h, vilket korresponderar med fyra timmars utmatning (Malmros, pers. medd., 2013).

För att ha säkerhetsmarginal bestämdes utmatningstiden till fem timmar, vilket motsvarar ett flöde på 16 m³/h. Detta skulle kräva en ombyggnation av dagens system, från ett rör från vardera rötchammaren till rotamaten till två rör till varsin rotamat. Det skulle vara möjligt att dra rören så att två rör och två pumpar kan användas för båda rötkamrarna (Malmros, pers. medd., 2013). Genom ett gemensamt uppsamlingskärl efter båda rotamaterna skulle endast en pump behövas för att pumpa rötresten till rötrestlagret. Alla pumpar som skulle behövas finns således på anläggningen idag. Ett alternativ skulle vara att pumpa ur direkt till rötrestlagret (med högt flöde) och rena materialet i den nuvarande rotamaten på väg till en ny tank. Den förra lösningen bedömdes dock som enklare och betydligt billigare.

Med tio timmars hygienisering och fem timmars urpumpning återstår nio timmar för inpumpning. Det motsvarar ett flöde på 8,9 m³/h. För att få så jämn gasproduktion som möjligt bör matningen ske enligt Tabell 1.

Tabell 1. Schema för in- och utmatning i rötkamrarna. 9 h inmatning, 9 h hygienisering, 5 h utmatning.

Timme	RK1	RK2
1	IN	HYG
2	IN	HYG
3	IN	HYG
4	IN	HYG
5	IN	HYG
6	IN	HYG
7	IN	HYG
8	IN	UT
9	IN	UT
10	HYG	UT
11	HYG	UT
12	HYG	UT
13	HYG	IN
14	HYG	IN
15	HYG	IN
16	HYG	IN
17	HYG	IN
18	HYG	IN
19	HYG	IN
20	UT	IN
21	UT	IN
22	UT	HYG
23	UT	HYG
24	UT	HYG

Utgångspunkten var till en början att värmen (efter eventuell värmeväxling) skulle tillföras substratet via rötkammarens cirkulationskrets. Det konstaterades utifrån drifttiden för pumpen på vattenkretsen att värmningen av rötkammaren har en viss potential att utökas då den används för uppvärmning ca 7 h/dygn. Kapaciteten var således att värma via cirkulationskretsen under 17 h/dygn, det vill säga 8,5 h per inmatningsperiod. Eftersom vattenflödet inte kan varieras kan inte effektuttaget ökas. Den genomsnittliga effekten var 103 kW (till och med den 15/11 då beräkningarna utfördes).

Beräkningar av sluttemperaturen i rötkammaren då ouppvämt substrat matas in utfördes. Vid inmatning av 80 m³ substrat med temperaturen 23,7°C (årsmedeltemperaturen i bufferttanken) på 9 timmar, med tillförsel av värmeväxlarens medeleffekt under 8,5 timmar, erhålls sluttemperaturen i rötkammaren (om man antar aktiv rötkammarvolym 2200 m³) 51,3°C. Eftersom resten av värmeväxlarens kapacitet går åt till att kompensera för värmeförluster kommer temperaturen i rötkammaren succesivt att sjunka. Det betyder att det är nödvändigt med förvärmning av substratet innan det matas in och alternativ 4, se Figur 14, kan strykas.

För att temperaturen i rötkammaren inte ska sjunka måste värmesystemet hinna värma det dagligt tillförda substratet till 52°C på 8,5 h. Det innebär att inkommande substrat måste ha temperaturen 41,6°C.

Den tredelade cykeln (inmatning, hygienisering, utmatning) innebär att om inmatning till RK1 sker samtidigt som utmatning ur RK2 så måste hygienisering ske i RK1 samtidigt som RK2 matas. Det medför att inkommande och utgående ur de två rötkamrarna inte kan värmeväxlas direkt mot varandra och att alternativ 1 (se Figur 11) kan strykas.

En översiktlig dimensionering av alternativ 2 och 3 gjordes med en Excelmodell. Dessa innebar antingen värmeväxling mellan cirkulationskretsar på bufferttanken och rötrestlagret eller mellan inmatning och en cirkulation på rötrestlagret, se Figur 12 och 13.

Värmeväxlarens area och k-värde samt mediernas flöde och värmekapacitet lades in som variabler och temperaturerna på returflödena från värmeväxlarna beräknades på timbasis utifrån temperaturerna i tankarna och ekvation 6-9. Sedan beräknades temperaturerna i tankarna utifrån temperatur och volym hos materialet som värmeväxlats, materialet i tanken samt inflödet av kallare substrat eller varmare rötrest.

Resultatet från modellkörningar visade att man med mycket stora värmeväxlare skulle kunna utjämna temperaturen mellan rötrestlagret och bufferttanken/inmatat substrat till 39°C vid medeltemperatur (substrattemperatur 23,7°C) och 35°C på vintern (substrattemperatur 15°C). Körningarna visade också att alternativ 2 (med värmeväxling av cirkulationskretsarna) krävde större flöden och areor för att uppnå samma temperaturer. Detta beror på de små temperaturskillnader mellan tillopp och retur (0,2-0,3°C) som uppkommer då man återcirkulerar materialet till tankarna.

Resultatet innebar även att det krävs ytterligare värmning för att öka substratets temperatur till minst 41,6°C. Eftersom spetsvärmning ändå var nödvändig ansågs det rimligt att dimensionera denna för att värma substratet till 52°C före inmatning. Detta skulle medföra att hela kapaciteten hos värmeväxlingen på rötkammaren skulle finnas tillgänglig för varmhållning, vilket minskar risken för temperatursvängningar i rötkammaren. Varmhållningsbehovet är mätt på hösten och skulle kunna öka under vintern, då man kan anta att det är större transmissionsförluster från rötkammaren. Detta skulle minska kapaciteten för uppvärmning av substrat. Ett system där man matar in substrat med temperaturen 52°C ansågs därför tryggare. Två olika metoder identifierades som möjlig spetsvärmning – antingen med direkt ångtillsats i de befintliga pastöriseringstankarna eller genom värmeväxling mot hetvattenkretsen.

13.2 Val av systemutformning

13.2.1 Värmeväxling

Fördelar och nackdelar med de två systemen för värmeväxling undersöktes. En fördel med båda är att utmatningen är oberoende av värmeväxlingen, vilket innebär att ett stopp i

värmeväxlaren inte påverkar driften lika mycket. Med alternativ 3 är däremot inmatningen beroende av värmeväxlaren. Denna nackdel bedömdes dock som mindre betydande, eftersom inmatningen sker under en längre tidsperiod, och någon timmes driftstopp kan kompenseras med högre inmatningsflöde.

Alternativ 2 innebär att bufferttankens temperatur höjs, vilket skulle kunna vara en fördel. På Borås biogasanläggning värms substratet till 40°C innan det pumpas till bufferttanken för att hydrolysen ska starta redan där (Martinsson, pers. medd., 2013). Ett möjligt problem med en högre temperatur är risken för oönskad biologisk aktivitet. I augusti 2013 ökade uppehållstiden i bufferttankarna på Kungsängens gård och detta i kombination med en ökad andel slakteriavfall (24 % jämfört med i normalfallet 13-15 %) resulterade i skumningsproblem i flera av tankarna, där substratet jäste och rann ut i ventilationssystemet. Temperaturen i tankarna var vid tillfället ca 30°C. Enligt processingenjören på anläggningen i Borås beror skumningsrisken inte främst på temperaturen utan på om man får in mer skumningsbenäget material, som slakteriavfall, i tanken (Martinsson, pers. medd. 2013). Detta överensstämmer med erfarenheten från Kungsängens gård. Risken för skumning kan dock öka vid en högre substrattemperatur eftersom biologisk aktivitet generellt ökar vid högre temperaturer (Nordberg, pers. medd., 2013).

De små differenserna mellan tillopps- och returtemperatur hos alternativ 2 medför att det krävs stora flöden. Detta är i sig inget problem, då man med stora flöden även kan ha större värmeväxlararea utan att få betydande mottryck (Holm, pers. medd., 2013; Manselin, pers. medd., 2013). Det skulle troligen även bli mindre stopp i rören (Malmros, pers. medd., 2013). Däremot skulle en större värmeväxlare förmodligen vara dyrare och kräva större pumpar med större elförbrukning. Den mindre skillnaden mellan temperaturerna på kallt substrat och varm rötrest som erhålls om bufferttanken värms upp skulle även kunna innebära att energiöverföringen minskar till mycket små nivåer om värmeöverföringen försämras genom beläggningar på rörväggarna. En tillverkare av värmeväxlare har tidigare tittat på möjligheten att värmväxla två tankar mot varandra men inte fått det lönsamt, främst på grund av de små temperaturdifferenserna (Manselin, pers. medd., 2013).

På grund av de större osäkerheterna med alternativ 2 valdes alternativ 3 för värmväxlingen, det vill säga att substratet på väg till rötkammaren värmväxlas mot en cirkulationskrets på rötrestslagret.

13.2.2 Spetsvärmning

Först utreddes möjligheten att koppla en ytterligare värmväxlare på värmesystemet. För att värma substratet från 35°C (den högsta temperaturen som är möjlig att uppnå efter värmväxling på vintern) till 52°C krävs en effekt på 158 kW. Vid 39°C substrattemperatur krävs 121 kW. Den installerade effekten på ång/vatten-värmväxlaren är 125 kW (Jonson, pers. medd., 2013) och varmhållningen drar ca 103 kW. Kapaciteten hos värmesystemet är alltså för liten för att tillgodose båda behoven samtidigt, och på vintern är den även för liten för att tillgodose spetsvärmningens behov ensamt. Spetsvärmningen kan alltså inte ske med

värmewäxling mot dagens hetvattenkrets. Om en ång/vattenvärmewäxlare med högre kapacitet installerades skulle det däremot vara möjligt. Det finns planer på att byta ut pannan (Malmros, pers. medd., 2013), och då skulle en hetvattenpanna kunna vara aktuell. Om värmesystemet byggs om i samband med detta skulle värmewäxling kunna ingå.

I dagens läge är det mer rimligt att använda pastöriseringstankarna för spetsvärmning. Ångvärmningen kan starta medan en tank fylls, och studier av temperaturförändringarna vid dagens drift visar att kapaciteten gott och väl räcker för att hinna värma substratet till 52°C tills tanken är full. Det behövs alltså ingen väntetid mellan fyllning och tömning. I princip skulle det därför bara behövas två tankar. En idé är dock att använda alla tre tankarna och hela tiden hålla dem fyllda. Detta skulle ge längre uppehållstid i pastöriseringstankarna och hydrolysen skulle kunna starta där.

Beräkningarna utgick från substrattemperaturen som erhållits efter värmewäxling, och energibehovet för att värma substratet till 52°C togs fram. Valideringen i kapitel 12.4 visade dock att en sådan beräkning underskattade behovet. Därför användes kvoten mellan det uppmätta biogasbehovet i kapitel 12.3 och energibehovet som tagits fram i validering 2 (se kapitel 12.4). Det beräknade behovet multiplicerades sedan med denna kvot.

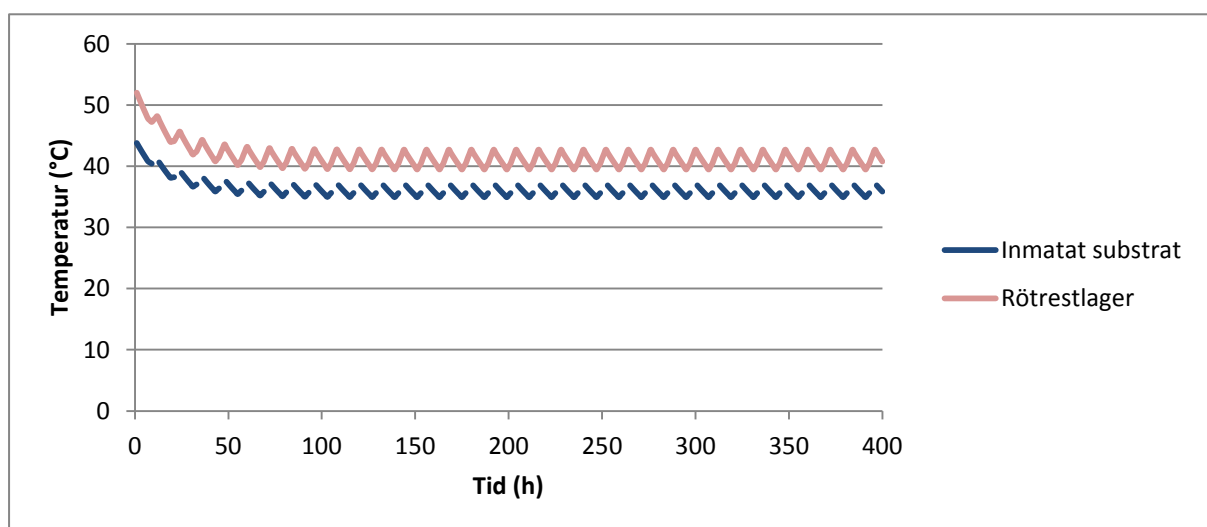
13.3 Dimensionering och energibehov

Värmewäxlaren designades med en vattenkrets mellan substrat- och rötrestkretsarna. Det är vanligt att ha ungefär samma flöde på båda sidor av värmewäxlaren (Manselin, pers. medd., 2013) så den dimensionerades för både substrat- och rötrestflöden på 8,9 m³/h. Det ger en maximal värmeöverföringsarea på 25 m², då man annars får för stort mottryck i ledningen (Manselin, pers. medd., 2013). Vid dessa flöden kan man räkna med k-värden på 0,73–0,88 kW/m²K på substratsidan och 1,22–1,45 kW/m²K på rötrestsidan (Manselin, pers. medd., 2013). Egentligen bör beräkningarna utföras som om det vore två värmewäxlare, en från substrat till vatten och en från vatten till rötrest. Då modellen som användes försummade värmeförluster gjordes förenklingen att även vattenkretsen var förlustfri. Det innebar att värmewäxlaren kunde hanteras som en enhet som växlar direkt från substrat till rötrest, och där värmeöverföringen begränsas av substratsidans k-värde. Detta antogs vid beräkningarna vara 0,8 kW/m²K.

Modellen modifierades även genom att in- och utmatning ur rötkamrarna enligt Tabell 1 inkluderades. Detta innebär flöde ut ur bufferttanken (8,9 m³/h) och in i rötrestlagret (16 m³/h) enligt Tabell 2. Inflödet till bufferttanken, utflödet ur rötresttanken samt tankarnaas volym antogs vara konstant över dygnet, vilket är förenklingar. En körning av modellen visas i Figur 23. Efter en inledande tid stabiliseras temperaturerna. Temperaturen i rötrestlagret sjunker då värmewäxlingen börjar men stiger sedan när varm rötrest pumpas in i tanken. På grund av variationerna förändras även temperaturen på substratet. Temperaturen i rötrestlagret varierar mellan 40,3 och 42,0°C och substrattemperaturen mellan 34,9 och 36,9°C med ett medelvärde på 35,8°C.

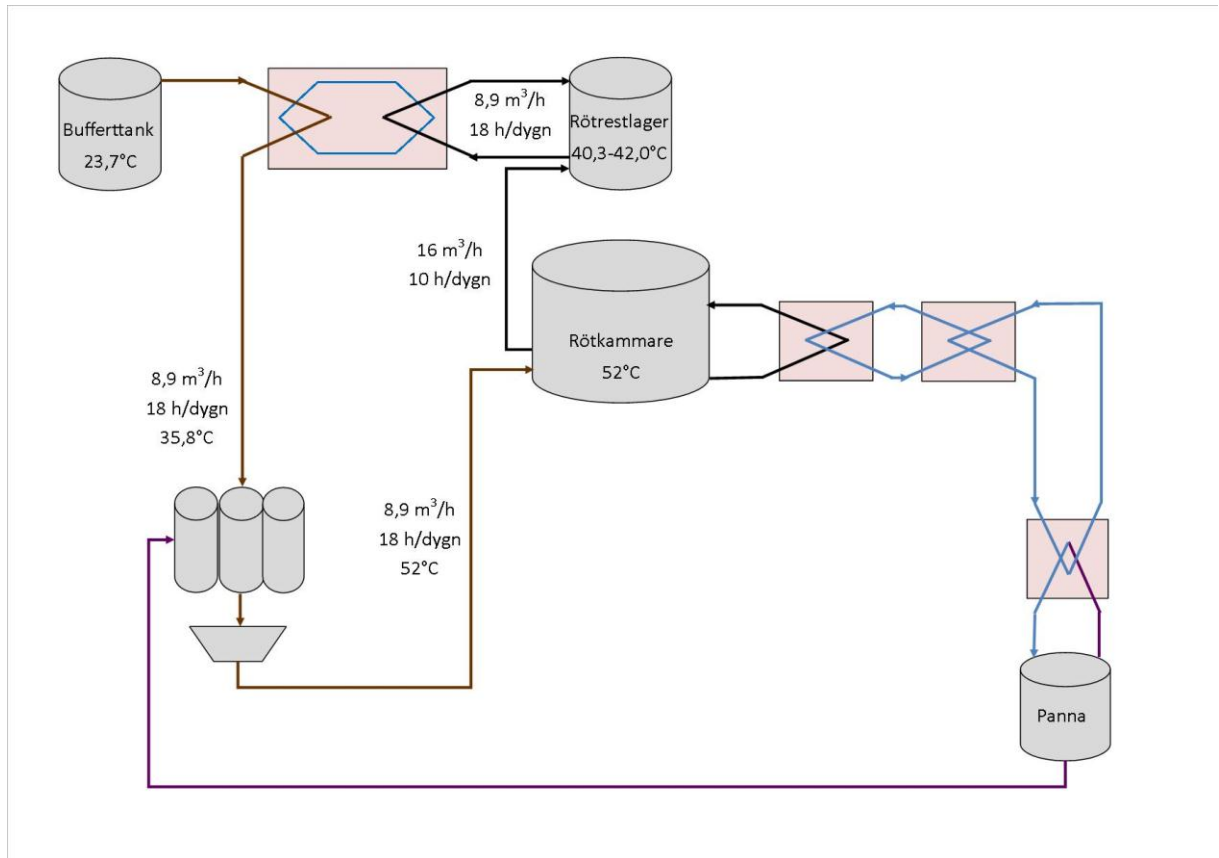
Tabell 2. Flöde av substrat ut från bufferttanken och rötrest in till rötrestlagret fördelat över dygnet. Baserat på tabell 1.

Timme	Bufferttank	Rötrestlager
1	Ut (till RK1)	
2	Ut (till RK1)	
3	Ut (till RK1)	
4	Ut (till RK1)	
5	Ut (till RK1)	
6	Ut (till RK1)	
7	Ut (till RK1)	
8	Ut (till RK1)	In (från RK1)
9	Ut (till RK1)	In (från RK1)
10		In (från RK1)
11		In (från RK1)
12		In (från RK1)
13	Ut (till RK2)	
14	Ut (till RK2)	
15	Ut (till RK2)	
16	Ut (till RK2)	
17	Ut (till RK2)	
18	Ut (till RK2)	
19	Ut (till RK2)	
20	Ut (till RK2)	In (från RK1)
21	Ut (till RK2)	In (från RK1)
22		In (från RK1)
23		In (från RK1)
24		In (från RK1)



Figur 23. Temperatur på inmatat substrat och i rötrestlagret efter värmeväxling.

Behovet av spetsvärmning beräknades utifrån substratets medeltemperatur och kvoten (se kapitel 13.2.2) till 0,24 kWh/ kg VS. Det slutliga processchemat inklusive temperaturer och flöden visas i Figur 24.



Figur 24. Processchema för det valda systemet med integrerad termofil hygienisering. Flöden, drifttider och temperaturer.

13.4 Elbehov

Jämfört med det befintliga systemet kunde vattenpumparna till den ena substratvärmväxlaren tas bort. Elförbrukningen för den andra värmväxlaren ansågs motsvara förbrukningen för den nya substrat/røtrestvärmväxlaren. De flesta pumpar antogs ha samma effektförbrukning och drifttid som i det befintliga systemet. Omrørarna till pastöriseringstankarna antogs dra samma effekt som tidigare men drifttiden ökades till 24 h/dygn (eftersom tankarna antogs vara fyllda hela tiden). Effekten för pumpningen av substrat till pastörisering antogs öka från 0,781 till 1 kW och inpumpning till røtkammaren antogs öka från 1,7 till 2 kW eftersom båda dessa flöden skulle ökas från 7,8 till 8,9 m³/h. Ökningen för pumpningen till sandavvattnaren försumrades. Effekten för urpumpning av røtkammarna uppskattades öka från 0,6 (RK2) respektive 0,8 kW (RK1) till 1 kW då flödet skulle ökas. Drifttiderna sattes till 18 timmar för inpumpning och 10 timmar för urpumpning och rotamat. Två nya komponenter adderades, en cirkulationspump för røtrestlagret med drifttiden 18 h/dygn och en rotamat med drifttiden 10 h/dygn. Cirkulationspumpen antogs dra 1 kW och rotamaten 1,5 kW (samma som den gamla rotamaten).

Elförbrukningen per dygn och komponent visas i Tabell 3. Satt i relation till den dagliga inmatningen av organiskt material erhålls elförbrukningen 0,034 kWh/kg VS.

Tabell 3. Elförbrukning per dygn för de olika enheterna vid integrerad termofil hygienisering med total daglig inmatning 160 m³.

Enhet	Funktion	Effekt (kW)	Drifttid (h/dygn)	Energiförbrukning (kWh/dygn)
SUPU-201	Substrat från pastöriseringstank 1	3,2	0,6	2,1
SUPU-202	Substrat från pastöriseringstank 2	1,7	1,5	2,5
SUPU-203	Substrat från pastöriseringstank 3	2,6	0,9	2,2
SUPU-204	Substrat från sandavvattare	2,0	18	36,0
RRPU-302	Rötrestart från röt-kammare 2	1,0	10	10,0
RIPU-301	Cirkulation röt-kammare 2	2,9	24	70,4
SBP-001	Cirkulation bufferttank	5,6	24	133,4
SBP-002	Substrat till pastörisering	1,0	18	18,0
P-314	Vattenkrets vvx 3	1,8	18	32,4
P-311	Cirkulation röt-kammare 1	5,4	24	129,8
RRP-009	Rötrestart från röt-kammare 1	1,0	10	10,0
VCP-301	Vattenkrets (vvx)	5,5	6,6	36,1
VCP-15	Hetvattenkrets	1,5	24	36,0
O-303	Pastöriseringstank 3	0,9	24	21,6
HYOR-02	Pastöriseringstank 1	1,5	24	36,0
HYOR-03	Pastöriseringstank 2	1,5	24	36,0
RRPR-300	Rotamat	1,5	10	15,0
	Ny rotamat	1,5	10	15,0
	Cirkulation rötrestlager	1,0	18	18,0
Summa				660,6

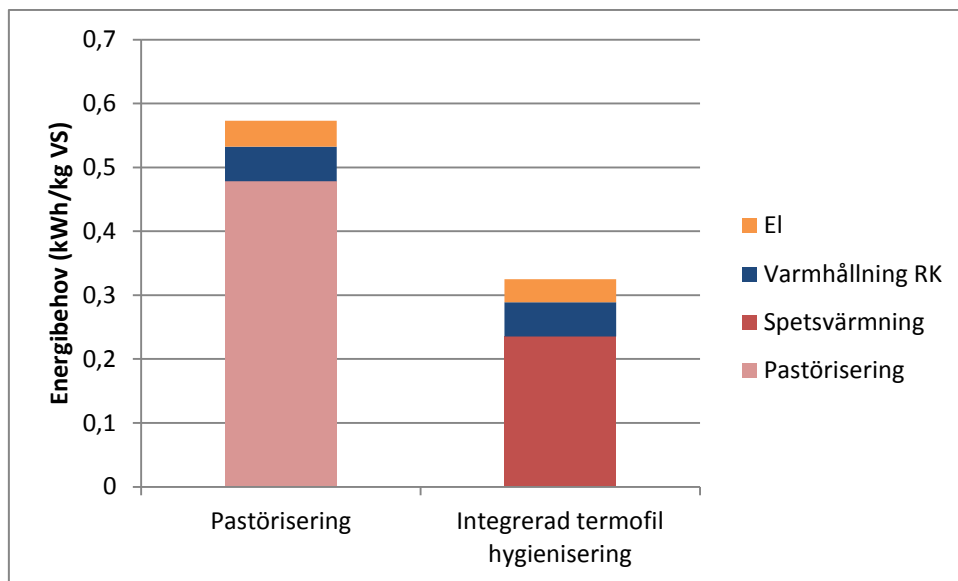
14 Jämförelse av hygieniseringssystemen

Labbresultaten visar att ingen skillnad i biogasproduktion mellan reaktorerna, varför kvoten k i ekvation 17 blir 1. Under perioden producerades i snitt 14 893 Nm³ biogas/dag med en metanhalt på 62 %. Detta motsvarar en energiproduktion på 91 505 kWh/dag eller 5,80 kWh/kg VS. Denna energiproduktion gäller således både för det nuvarande systemet med pastörisering samt det hypotetiska systemet med integrerad termofil hygienisering.

För pastöriseringssystemet blir det totala värmebehovet (pastörisering + varmhållning av röt-kammare) 0,532 kWh/kg VS, vilket ger ett specifikt behov på 9,17 % av den producerade energin enligt ekvation 19. Det specifika elbehovet enligt ekvation 20 blir 0,70 % av den producerade energin.

För integrerad termofil hygienisering blir det totala värmebehovet (spetsvärmning + varmhållning av rötkamrarna) 0,289 kWh/kg VS, vilket ger ett specifikt behov på 4,98 % av den producerade energin. Det specifika elbehovet blir 0,62 % av den producerade energin.

Energibehovets fördelning för de två hygieniseringssystemen visas i Figur 25. Ett byte av hygieniseringssystem skulle alltså kunna spara 46 % av dagens värmeförbrukning i hygieniseringsdelen eller 0,243 kWh/kg VS. Det motsvarar med ett års inmatning 1,22 GWh.



Figur 25. Energibehov fördelat på de olika posterna för de två hygieniseringssystemen.

15 Känslighetsanalys

15.1 Befintlig pastörisering – pannans förbrukning av biogas

En osäker faktor i energikartläggningen var pannans förbrukning av biogas, se Bilaga C – Korrigering av gasflödesmätning. Då denna misstänktes kunna påverka resultatet i stor utsträckning gjordes en känslighetsanalys. Den sista veckan hade gasmätaren flyttats och den uppmätta förbrukningen kunde antas vara korrekt. Dessa värden indikerar att pannans förbrukning snarare var 85 Nm³/h vid höglast och 50 Nm³/h vid låglast (jämfört med 74 respektive 47 Nm³/h som använts vid beräkningen av kvoten). Används dessa värden blir en ny kvot 1,04 (jämfört med 1,15). Det innebär en högre beräknad biogASFörbrukning i pannan, och därmed ett högre pastöriseringsbehov. Pastöriseringsbehovet ökar med 10 % till 0,585 kWh/kg VS och utgör då 86 % av den totala energiförbrukningen.

Besparingen vid ett byte av hygieniseringssystem skulle därmed öka till 0,266 kWh/kg VS. Det innebär en årlig besparing på 1,33 GWh/år, vilket är 9 % mer än i det ursprungliga resultatet.

15.2 Integrerad termofil hygienisering – modellen av värmeväxlaren

För den integrerade termofila hygieniseringen var en av de största osäkerheterna modellen av värmeväxlaren. Eftersom den inte inkluderar förluster finns det skäl att misstänka att temperaturen på substratet i praktiken kan bli något lägre, vilket resulterar i ett större spetsvärmningsbehov. Förluster i värmeväxlaren på 10 % motsvarar ungefär en temperatursänkning på 1,2°C. Om substratet i stället för 32,8°C håller 31,6°C krävs spetsvärmning på 0,30 kWh/kg VS. Det motsvarar en ökning med 26 % jämfört med det ursprungliga resultatet. Det ökar det totala värmebehovet till 0,35 kWh/kg VS, vilket innebär en energibesparing på 0,18 kWh/kg VS eller 34 % jämfört med pastöriseringssystemet. Då erhålls en besparing på 0,91 GWh/år. Detta är 25 % mindre än det ursprungliga resultatet.

16 Ekonomisk analys

De ekonomiska följderna av energibesparingen beror på hur värmen värderas. Leder besparingen till att mer biogas kan uppgraderas och säljas, och hur mycket är denna värd? En enkel ekonomisk analys utfördes med utgångspunkt i att en ny panna redan upphandlas. Det blir troligen en pelletspanna, vilket kommer att öka mängden biogas som kan uppgraderas och säljas. Eftersom upphandlingen redan är ute kommer inte ett eventuellt byte av hygieniseringsmetod med en medföljande energibesparing att påverka dimensionering av pannan eller mängden biogas som kan säljas. Alla fasta kostnader för pannan består och det endast är bränslekostnaden som minskar om värmebehovet minskar (Nordin, pers. medd., 2013). Därför gjordes en beräkning av hur kostnadsbesparingen för en minskad pelletsförbrukning förhåller sig till investeringskostnaderna som följer med integrerad termofil hygienisering. Detta gjordes både för det ursprungliga resultatet och för resultatet från känslighetsanalysen där förluster i värmeväxlaren hade inkluderats.

Värmeväxlaren skulle kosta ungefär 500 000 kr (Manselin, pers. medd., 2013). Till det lades 200 000 kr för installation av värmeväxlaren och inkoppling av styrteknik. Kostnaderna för en pump och nya rördragningar uppskattades till 100 000 kr. Pellets i bulk kostar vid beställning via Internet ca 2400-2900 kr/ton (SCA, 2013; Stora Enso, 2013), vilket med ett värmevärde på 4,8 MWh/ton motsvarar 0,5 – 0,6 kr/kWh. Med avtal skulle priset bli lägre, och för att hellre underskatta än överskatta besparingen antogs priset vara 0,3 kr/kWh. Det är ungefär vad värmeverk och industriförbrukare betalar för pellets (Energimyndigheten, 2013b).

Resultatet från de ekonomiska beräkningarna visas i Tabell 4. Det visar att investeringarna skulle vara återbetalda efter 2,2 år för det ursprungliga resultatet och efter 2,9 år då förluster i värmeväxlaren lagts till. Detta är korta återbetalningstider vilket tyder på att investeringen skulle vara lönsam.

Tabell 4. Ekonomisk analys för det ursprungliga resultatet samt känslighetsanalysen där 10 % förluster i värmeväxlaren lades till.

	Resultat	Känslighetsanalys
Energibesparing (GWh/år)	1,22	0,91
Pelletspris (kr/kWh)	0,3	0,3
Kostnadsbesparing (kr/år)	336 000	273 000
Summa investeringar (kr)	800 000	800 000
Återbetalningstid (år)	2,2	2,9

17 Diskussion

17.1 Labbförsök – jämförelse med verkligheten

Vid nedskalning av en verklig biogasprocess till labbskala blir vissa förändringar nödvändiga av praktiska skäl. Nedan diskuteras labbförsökets överensstämmelse med verkligheten.

17.1.1 Pastöriseringstemperatur

Pastöriseringen i labbförsöken sker med en annan metod än i verkligheten, vattenbad i stället för ånginblandning. Detta anses inte påverka resultatet. Temperaturvariationen ligger nära verkligheten, vid pastöriseringen på anläggningen är den runt 73-76°C. Uppehållstiden varierar, och ibland pumpas substratet in i rötkammaren omedelbart efter pastörisering, ibland stannar det i tanken i flera timmar. Pastöriseringen i labbförsöken anses vara tillräckligt representativ för anläggningen.

17.1.2 Matning och gasproduktion

Matningen av labbreaktorerna en gång om dagen i stället för genom semikontinuerlig inmatning ger den största skillnaden mellan labbet och verkligheten. Enligt Anna Schnürer, professor på Institutionen för mikrobiologi, SLU, kan detta leda till en något lägre total produktion eftersom rötkamrarna belastas hårdare periodvis (precis efter matning). Detta stämmer med erfarenheterna från detta projekt, där produktionen på labbet var något lägre än på anläggningen. Att man sedan matar in hela veckans belastning på sex dagar i stället för sju gör inte lika stor skillnad (Schnürer, pers. medd., 2013).

Allt substrat till labbförsöket togs från anläggningen vid ett tillfälle, så det kan ifrågasättas om det är representativt. Eftersom TS- och VS-halt samt metanutbytet var inom variationen som uppmätts på anläggningen ansågs substratet vara representativt för anläggningen. TS- och VS-försöken visade dock att halterna varierade mellan substrathinkarna, och det är oklart om halterna var konstanta över tid när substratet var tinat. Eftersom den dagliga mängden inmatat substrat var konstant under perioden innebär det att den organiska belastningen varierade. Vid beräkningarna av den specifika energiproduktionen har ändå de första beräkningarna av organisk belastning använts. Reaktorerna matades hela tiden med likvärdigt substrat från samma hink och därför påverkade inte variationen skillnaden mellan

reaktorerna. Eftersom det var skillnaden mellan reaktorerna som var det primära resultatet, inte de absoluta värdena på den specifika energiproduktionen, gjordes ingen omräkning av den organiska belastningen. Trots osäkerheten var dock metanutbytet i rätt storleksordning, då det låg inom det normala intervallet som erhålls på anläggningen.

17.2 Labbförsök – energiutbyte och stabilitet

Hypotesen när projektet startade var att energiutbytet skulle bli mindre med opastöriserat substrat jämfört med pastöriserat substrat. Resultaten från labbförsöken visade att pastöriseringen inte påverkar metan- och därmed även energiutbytet. Det innebär att man kan förvänta sig samma produktion om man byter hygieniseringsmetod på anläggningen.

Strömavbrottet kan inte anses ha påverkat resultatet eftersom båda reaktorerna återhämtade sig och var stabila i nästan tre uppehållstider efter strömavbrottet. Fettsyraanalyserna visar att båda reaktorerna efter en initial störning var stabila, och ingen skumning inträffade under projektperioden. De tidigare datapunkterna som indikerade en högre produktion från GC2 kan betraktas som en uppstartsfas. GC2 hade den 27/8 höga halter av fettsyror som när de bröts ner skulle kunna orsaka en större gasproduktion och därmed förklara det höga veckomedelvärdet den 6/9 (Schnürer, pers. medd., 2013).

Att det inte blir någon skillnad i energiutbyte kan bero på att pastöriseringen inte påverkar substratets tillgänglighet för mikroorganismerna på ett sätt som har inverkan på produktionen. Den uteblivna effekten kan också bero på att den organiska belastningen i försöket har varit relativt låg. Belastningen var, som på biogasanläggningen Kungsängens gård, 3,5 kg VS/m³,dygn. Även om det pastöriserade substratet har varit lättare att bryta ner så har reaktorn som fått opastöriserat substrat "hunnit ifatt" eftersom den hade lång tid på sig innan den matades igen. Detta stöds till viss del av loggningen av gasflöde (se Bilaga A – Labbresultat). Där indikeras att nedbrytningen av det pastöriserade substratet går något snabbare än nedbrytningen av det opastöriserade substratet. Om belastningen ökades kanske reaktorn med opastöriserat substrat inte skulle hinna bryta ner allt substrat innan matning skedde igen. Man skulle då kunna få ansamling av intermediära produkter som fettsyror och drabbas av instabilitetsproblem (Schnürer, pers. medd., 2013).

Man är vid Uppsala Vatten och Avfall AB intresserade av att öka den organiska belastningen på anläggningen för att kunna ta emot mer substrat och producera mer biogas. Ett tidigare examensarbete har visat att det är möjligt att öka den organiska belastningen (med pastöriserat substrat) till 6 kg VS/m³,dygn utan stabilitetsproblem (Frid, 2012). Efter examensarbetet gjordes försök med opastöriserat substrat som var spetsat med slakteriavfall, vilket gick bra under tre uppehållstider med belastningen 2,2 kg VS/m³,dygn. När belastningen ökades till 3,91 kg VS/m³,dygn började fettsyror ansamlas, skumning inträffade och reaktorn havererade (Schnürer, pers. medd., 2013). Resultaten från försöket kan inte appliceras direkt i det här projektet eftersom substrat hade större andel fett och protein vilket kan ge större risk för skumning. Försöken tyder dock på att processen klarar låga belastningar med opastöriserat substrat men är känslig vid belastningsökningar. Det är

troligt att ett opastöriserat substrat ökar risken för störningar (Schnürer, pers. medd., 2013), och man bör därför vara försiktig vid ett byte av hygieniseringsmetod, särskilt i kombination med en belastningsökning och en eventuell ökning av andelen slakteriavfall.

17.3 Energibehov för dagens pastörisering

Resultatet av energikartläggningen av den nuvarande pastöriseringen skiljer sig från siffror som erhållits i ett tidigare examensarbete. Mats Andersson (2011) kom fram till att pastöriseringen och rötningen konsumerar 11 kWh el per ton inmatat substrat. Räknas resultaten i detta projekt om till samma enhet erhålls 4,9 kWh/ton. Värmebehovet beräknades till 129 kWh/ton för pastöriseringen och 41 kWh/ton för rötningen (Andersson, 2011), vilket kan jämföras med detta projekts resultat 57 kWh/ton för pastörisering och 4,5 kWh/ton för rötning. Anderssons tillvägagångssätt var ett annat än vad som använts i detta projekt och anläggningen såg annorlunda ut, exempelvis genom att det bara fanns en rötkammare. Detta antas förklara skillnaderna i resultaten.

17.3.1 Representativt energibehov?

Temperaturen på substratet i bufferttanken varierar över året, vilket innebär olika stort ångbehov vid pastöriseringen. Kallare substrat leder till ett större behov av ånga i pastöriseringstankarna på vintern. Eftersom energibehovet bara mättes under ett par månader undersöktes hur representativt det var för ett helt år. Medeltemperaturen i bufferttanken var under perioden 24,5°C. Motsvarande temperatur under år 2012 var 23,7°C. Då dessa temperaturer är ganska nära varandra antogs värmebehovet för pastöriseringen vara representativt för ett helt år.

Även utomhustemperaturen förändras under året vilket påverkar värmeförlusterna från rötkamrarna. Detta ger varierande behov av tillförd värme via cirkulationskretsen. Temperatur- och flödesgivarna installerades under projektperioden vilket innebär att endast data för 26/9-13/12 fanns att tillgå. För att uppskatta det genomsnittliga behovet över ett helt år måste utomhustemperaturen under projektperioden sättas i relation till årsmedeltemperaturen. Eftersom pastöriseringsbehovet relaterades till år 2012 användes data för 2012 även för varmhållningsbehovet. Medeltemperaturen i Uppsala år 2012 var 6,5°C (SMHI, 2013a). Medeltemperaturen i Uppsala under oktober-november 2013 var 5,3°C (SMHI, 2013b; SMHI, 2013c). Temperaturerna är relativt nära varandra, och därför antogs det erhållna värmebehovet vara representativt för ett helt år.

Man kan inte se någon ökning av värmebehovet under perioden. Det tyder på att utomhustemperaturen inte påverkar värmebehovet i stor utsträckning och styrker bilden av resultatets representativitet.

Rötkammare 1 hade högre varmhållningsbehov än Rötkammare 2. Det beror troligen till största delen på att delar av isoleringen på RK1 var bortmonterad under projektperioden (Nordin, pers. medd., 2013). Det kan även bero på att RK1 har en större volym än RK2 och därmed större yta där värmeförluster kan ske. Detta påverkar resultatets representativitet,

men eftersom det handlar om en liten del av det totala värmebehovet har detta inte tagits hänsyn till i slutanalysen.

17.4 Energibehov för integrerad termofil hygienisering

I modelleringen av värmeväxlaren antogs volymerna i buffert- och rötresttanken ligga konstant på medelnivån under 2012. Detta är dock inte fallet i verkligheten. Hur variation av nivåerna i tankarna skulle påverka värmeväxlingen har inte undersökts.

Vid dimensioneringen av integrerad termofil hygienisering valdes ångtillsats i pastöriseringstankarna som spetsvärmning eftersom det är det rimligaste alternativet vid ett byte av hygieniseringssystem i dagens läge. Samtidigt pågår en upphandling av en ny panna som kan resultera i en hetvattenpanna där en ånggenerator läggs till för att fylla pastöriseringsbehovet (Nordin, pers. medd., 2013). Vid ett byte av hygieniseringssystem med en sådan panna är det troligt att värmeväxling mot hetvattenkretsen skulle vara fördelaktig för spetsvärmning eftersom ångproduktionen är förknippad med större förluster. Skulle detta vara fallet kan resultatet i detta projekt ändå användas, eftersom det ger en uppfattning om energibehovet för spetsvärmning, oavsett värmekälla.

17.5 Jämförelse av systemen

Dimensioneringen av systemet med integrerad termofil hygienisering visar att energibehovet skulle minska med 42 % jämfört med dagens system. Det stämmer med erfarenheter som gjordes när flera svenska biogasanläggningars energibehov kartlades och jämfördes. Då hade anläggningarna med integrerad termofil hygienisering ungefär hälften så stort energibehov som anläggningarna som hade pastörisering (Yngvesson et al., ej publicerad). Den ekonomiska analysen visar att ett byte av hygieniseringssystem innebär stora årliga besparingar och de nödvändiga investeringarna skulle betalas tillbaka på 2,2 år.

Fördelen med integrerad termofil hygienisering jämfört med pastörisering är starkt beroende av effektiviteten i värmeväxling av det varma substratet efter pastöriseringen. Om mycket av värmen kan tas tillvara minskar den relativa fördelen. Det är möjligt att man skulle kunna göra energibesparingar i det nuvarande systemet som skulle minska fördelen av att byta system, exempelvis genom förbättrad värmeväxling. Detta har dock inte beaktats i det här projektet.

Känslighetsanalysen avseende pannans biogasförbrukning visar att osäkerheten i gasmätningen och valet av korrigeringskvoten påverkar resultatet. En annan antagen förbrukning vid hög- respektive låglast ökar energibesparingen med 9 % till 1,33 GWh/år. Det innebär att resultatet är relativt känsligt för denna faktor, men att behovet snarast har underskattats och besparingen kan bli ännu större än vad som beräknats i detta projekt.

Känslighetsanalysen avseende värmeväxlarens förluster visar att 10 % förluster minskar energibesparingen med 25 % till 0,91 GWh/år. Det innebär att resultatet är känsligt för denna faktor. 10 % förluster bör vara ett pessimistiskt scenario, då många i branschen försummar

förlusterna. Man talar i stället om överföringsförluster, vilka beror på k-värdet och är medräknade i modellen. Utifrån känslighetsanalysen kan även konstateras att det trots 25 % sänkning fortfarande finns en stor energibesparingspotential. Noggrannare beräkningar rekommenderas innan några beslut fattas.

Trots den stora potentiella besparingen vid ett byte av hygieniseringsmetod bör relationen till den totala biogasproduktionen beaktas. Eftersom värmebehovet idag utgör endast ca 9 % av produktionen motsvarar energibesparingen 4,2 % av den totala biogasproduktionen. Om bytet av hygieniseringsmetod medför driftstörningar som minskar produktionen med 4,2 % har hela vinsten uttraderats. Detta skulle till exempel motsvaras av ett driftstopp på 15 dagar. Det är alltså mycket viktigt att säkerställa stabiliteten och hålla produktionen uppe vid ett eventuellt byte av hygieniseringssystem.

18 Slutsats

Syftet med detta projekt var att jämföra den befintliga hygieniseringsmetoden pastörisering med integrerad termofil hygienisering. Hypotesen var att ett byte av hygieniseringsmetod skulle minska energiutbytet men också minska energiförbrukningen. Men resultaten från labbförsöken visar att biogasgasproduktionen inte påverkas av pastöriseringen. Båda processerna var stabila och ingen skillnad mellan reaktorernas energiutbyte kunde fastställas. Detta gäller dock vid en organisk belastning på 3,5 kg/m³, dygn och det är möjligt att en ökad belastning skulle innebära större risk för processtörningar för en röt-kammare som matades med icke pastöriserat substrat.

Energikartläggningen visade att 85 % av värmeanvändningen på anläggningen användes för pastöriseringen. Denna konsumerade 7430 kWh/dygn eller 0,48 kWh/kg VS. Varmhållningen av röt-kammarna förbrukade 0,077 kWh/kg VS för RK1 och 0,031 kWh/kg VS för RK2. Elförbrukningen var 0,041 kWh/kg VS.

Dimensioneringen av integrerad termofil hygienisering resulterade i ett system där inkommande substrat värmeväxlas mot en cirkulation på rötrestlagret. Värmeväxlaren antogs ha en area på 25 m² och beräknades värma substratet från 23,7 till 35,8°C. Sedan antogs substratet spetsvärmas till 52°C i de befintliga pastöriseringstankarna innan inmatning. Detta beräknades kräva 0,24 kWh/kg VS. Varmhållningsbehovet antogs vara samma som i det befintliga systemet och elbehovet beräknades till 0,034 kWh/kg VS.

Jämförelsen mellan systemen visar att den befintliga pastöriseringen kräver 9,2 % av den totala producerade energin för värme och 0,70 % för el i hygieniseringsdelen av processen. Integrerad termofil hygienisering skulle kräva 5,0 % för värme och 0,62 % för el. Detta innebär en värmebesparing med 46 % eller 1,22 GWh/år.

Resultatet påverkas dock i relativt stor utsträckning av effektiviteten i värmeväxlaren som dimensionerades för systemet med integrerad termofil hygienisering. Läggs 10 % förluster till i värmeväxlingen minskar den årliga besparingen till 34 % eller 0,91 GWh/år.

Slutsatsen är att det finns en stor potential att spara energi utan att förlora gasproduktion genom att byta hygieniseringsmetod. Det finns dock farhågor om sämre processtabilitet om integrerad termofil hygienisering kombineras med en ökad organisk belastning. En minskning av den totala produktionen på 4,2 % utraderar energibesparingen.

18.1 Förslag på vidare studier

För framtida studier rekommenderas att undersöka hur en ökad organisk belastning påverkar processtabiliteten vid integrerad termofil hygienisering. Eftersom man på Uppsala Vatten och Avfall AB är intresserade av att öka belastningen, medan endast en liten minskning av total biogasproduktion utraderar hela energibesparingen, är det viktigt att ta hänsyn till processtabiliteten vid ett eventuellt byte av hygieniseringsmetod.

En dynamisk modell av värmeväxlaren som inkluderar rimliga förluster och varierande nivåer i tankarna vore nödvändigt för att noggrannare kunna beräkna energibesparingen.

Andra faktorer i processutvecklingen på anläggningen är betydelsefulla för ett eventuellt byte av hygieniseringsmetod. Exempelvis skulle ett byte av panna till ett hetvattensystem kunna innebära att spetsvärmning genom värmeväxling mot hetvatten blir mer aktuell. Detta skulle kunna vara mer energieffektivt och bör undersökas. En utbyggnad av anläggningen med ökat hygieniseringsbehov som följd påverkar också de ekonomiska kalkylerna. Då ställs investeringarna som krävs för integrerad termofil hygienisering även mot investeringar för att utöka den befintliga pastöriseringen.

Hur värmeåtervinning från den nybyggda gasuppgraderingen påverkar substratets temperatur och därmed möjliga systemlösningar bör undersökas. Enkla beräkningar som utförts utanför detta projekt har visat att det potentiellt finns stora energimängder att återvinna, vilket skulle kunna höja substrattemperaturen och minska behovet av spetsvärmning. Det behöver dock utredas hur detta ska göras, hur mycket av energin som kan tillgodogöras och hur det skulle påverka resultaten från detta projekt.

19 Referenser

19.1 Skriftliga

19.1.1 Böcker

Alvarez, H. (2006) *Energiteknik*. 3:e upplagan. Lund: Studentlitteratur AB.

Crowder, R. (2006) *Electric Drives and Electromechanical Systems*. Amsterdam, Nederländerna: Elsevier.

Gerardi, M. H. (2003) *The Microbiology of Anaerobic Digester*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Mohan, N., Undeland, T. M. & Robbins, W. P. (2003) *Power Electronics. Converters, Application and Design*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Schavemaker, P. & van der Sluis, L. (2008) *Electrical power system essentials*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.

19.1.2 Vetenskapliga artiklar

Luste, S., Heinonen-Tanski H. & Luostarinen, S. (2011) Co-digestion of dairy cattle slurry and industrial meat-processing by-products – Effect of ultrasound and hygienization pre-treatments. *Bioresource Technology*, vol. 104 (2012), ss. 195-201.

Luste, S. & Luostarinen, S. (2011) Enhanced methane production from ultrasound pre-treated and hygienized dairy cattle slurry. *Waste Management*, vol. 31 (2011), ss. 2174–2179.

Rodríguez-Abalde A., Fernández, B., Silvestre, G. & Flotats, X. (2011) Effects of thermal pre-treatments on solid slaughterhouse waste methane potential. *Waste Management*, vol. 31 (2011) ss. 1488–1493.

19.1.3 Rapporter

Andersson, M. (2011) *Energikartläggning vid biogasanläggningen, Kungsängens gård*. Uppsala: SLU, Institutionen för energi och teknik. (Examensarbete 2011:01)

Barck-Holst, E. (2013) *Miljörapport 2012. Biogasanläggningen vid Kungsängens gård*. Uppsala: Uppsala Vatten och Avfall AB.

Berglund, M. & Börjesson, P. (2003) *Energianalys av biogassystem*. Lund: Lunds tekniska högskola, Institutionen för teknik och samhälle. (Rapport nr 44).

Christensson, K., Björnsson, L., Dahlgren, S., Eriksson, P., Lantz, M., Lindström, J., Mickelåker, M. & Andersson, H. (2009) *Gårdsbiogashandbok*. Malmö: Swedish Gas Centre. (SGC Rapport 206).

Frid, S. (2012) Optimering och effektivisering av biogasprocessen vid biogasanläggningen Kungsängens gård. Uppsala: SLU, Institutionen för mikrobiologi. (Examensarbete 2012.)

Gyrulf, H. (2012) *Produktion och användning av biogas 2011*. Eskilstuna: Energimyndigheten. (ES 2012:08).

Jarvis, Å & Schnürer, A. (2009) *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Svenskt Gastekniskt Center. (SGC Rapport 207).

Norin, E. (2007) *Alternativa hygieniseringsmetoder*. Malmö: Avfall Sverige (Rapport B2007:01).

Svahn, J. (2006) *Energioptimering av biogasproduktion. Hur primärenergibehov till biogasanläggning kan minskas med energiåtervinning och isolering*. Umeå: Umeå universitets tekniska högskola. (Examensarbete 2006).

19.1.4 Icke publicerat material

Yngvesson, J., Persson, E., Fransson, M., Olsson, M., Henriksson, G. & Björkmalm, J. (Ej publicerad) *Energi- och kostnadseffektiv biogasproduktion från avfall – kartläggning och jämförande av nyckeltal*. Waste Refinery. (Projektnummer WR-54).

19.1.5 Offentliga tryck

Energimyndigheten (2012) *Energiläget 2012*. Eskilstuna: Energimyndigheten.

Energimyndigheten (2013b) *Trädbränsle- och torvpriser. Nr 2 2013*. Eskilstuna: Energimyndigheten.

Jordbruksverket (2011a) *Kategorisering av animaliska biprodukter*. Information. Version 2011-05-09. Jönköping: Jordbruksverket.

Jordbruksverket (2011b) *Rötning av animaliska biprodukter*. Jönköping: Jordbruksverket, Enheten för foder och hälsa.

19.1.6 Broschyrer

Grundfos (2013) *LM(D)E, LP(D)E, CLME. Ettrings-centrifugalpumper - elektronisk reglerede. 50 Hz*. Bjerringbro, Danmark. [Broschyr]

Svenskt gastekniskt center (2006) *Biogas. Basdata om biogas*. Malmö. [Broschyr]

19.1.7 Elektroniska dokument

Energigas Sverige (2013a) *Biogasens historia*.

<http://biogasportalen.se/FranRavaraTillAnvandning/VadArBiogas/Biogasenshistoria> [2013-09-02].

Energigas Sverige (2013b) *Biogas som drivmedel*.

<http://www.bioenergiportalen.se/?p=1453&m=924> [2013-10-25].

Energimyndigheten (2013a) *Biogas*.

<http://energimyndigheten.se/sv/Forskning/Bransleforskning/foradling/biogas/> [2013-09-02].

SCA (2013) *Räkna ut pelletspris och beställ*. <http://www.sca.com/sv/bionorr/Pris---Bestall/Bionorrpellets---pris-och-bestall/Rakna-ut-pris/#> [2013-12-20].

Stora Enso (2013) *Prislista*.

<http://pellets.storaenso.com/Admin/ARCHIVE/Download/PelletspricelistSWE20131022.pdf> [2013-12-20].

SMHI (2013a) *Året 2012 – Lufttemperatur*.

http://data.smhi.se/met/climate/time_series/year/vov_pdf/SMHI_vov_temperature_12.pdf [2013-11-21].

SMHI (2013b) *Oktober 2013 – lufttemperatur och vind*.

http://data.smhi.se/met/climate/time_series/month/vov_pdf/SMHI_vov_temperature_wind_okt13.pdf [2013-11-21].

SMHI (2013c) *November 2013 – lufttemperatur och vind*.

http://data.smhi.se/met/climate/time_series/month/vov_pdf/SMHI_vov_temperature_wind_nov13.pdf [2013-12-09].

19.2 Personlig kontakt

Cleréus, L., Torell Pump AB, Nacka. E-post 24/10-2013.

Gustafsson, R., Pumptechnik AB, Göteborg. E-post 17/10-2013.

Jonson, D., Technical Sales, EIE-ECF, Alfa Laval Nordic AB, Tumba. E-post 11/10-2013.

Malmros, P., Processingenjör, Uppsala Vatten och Avfall AB, Uppsala. Personlig kommunikation september-december 2013.

Manselin, S., Goodtech Environment AB, Mariehamn. Telefonsamtal 12/11-2013 och 2/12-2013.

Martinsson, R., Processingenjör, Borås Energi och Miljö AB, Borås. Telefonsamtal 13/9-2013. E-post 6/11-2013.

Nordberg, Å., Forskare, Institutionen för energi och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Telefonsamtal 5/11.

Nordin, L., Sektionschef Biogas, Uppsala Vatten och Avfall AB, Uppsala. Personlig kommunikation december 2013.

Ringh, C-H., Tendering & Sales Support, Sulzer Pumps Sweden AB, Norrköping. E-post 4/11-2013.

Schnürer, A., Professor, Institutionen för mikrobiologi, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala. Personlig kommunikation september-december 2013.

Svensson, C., Sales Manager Sweden, Danstoker A/S, Sävsjö. E-post 3/10-2013.

Werdien, M., Managing Director, Agimix Sweden AB, Borås. Telefonsamtal 21/10-2013.

Weselius, J., Weishaupt Svenska AB, Täby. Telefonsamtal 4/12-2013.

Bilaga A – Labbresultat

A.1 TS och VS

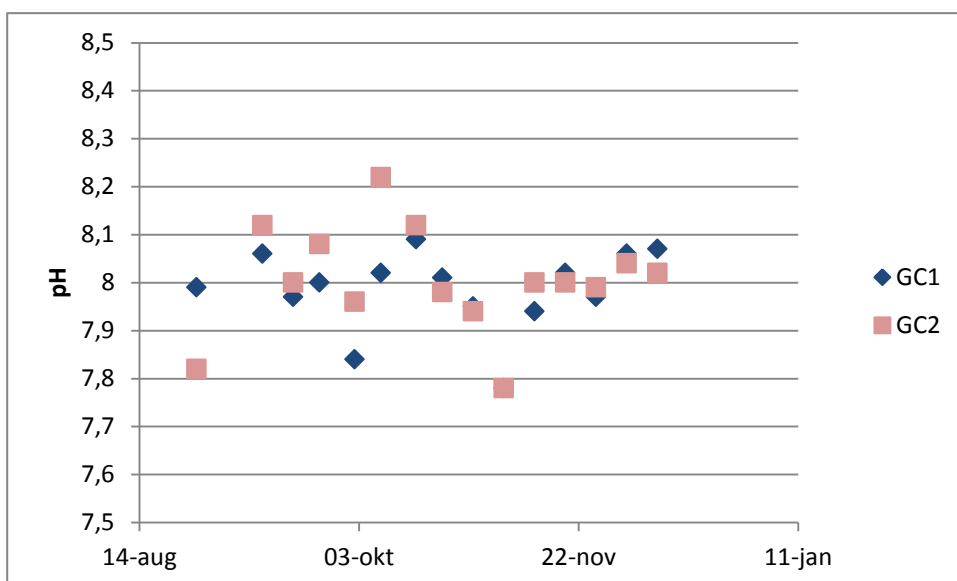
Det ursprungliga TS- och VS-provet hade resultatet 15,8 % respektive 88 %. Ett ytterligare prov gjordes på pastöriserat substrat den 24/10, då med TS-halten 14,6 %. Då resultatet skiljde sig så mycket från det första gjordes ytterligare tester den 29/10, då med både pastöriserat och icke pastöriserat substrat från både labbet på Uppsala Vatten (det substrat som sedan brukade pastöriseras) och från SLU. Dessa prov visade att det inte skiljde något mellan pastöriserat och icke pastöriserat substrat. Ett till test gjordes vid tinandet av den tredje hinken den 9/11, då med TS-resultatet 13,8 %. Dessa tester visar att TS-halten skiljde mellan hinkarna. Huruvida TS-halten varierade över tid i samma hink går inte att säga. Resultaten visas i Tabell 5.

Tabell 5. Resultat från TS- och VS-prov. 20/8 - prov på nytt substrat från första hinken. 24/10 och 29/10 - prov på gammalt substrat från andra hinken. 9/11 - prov på nytt substrat från tredje hinken.

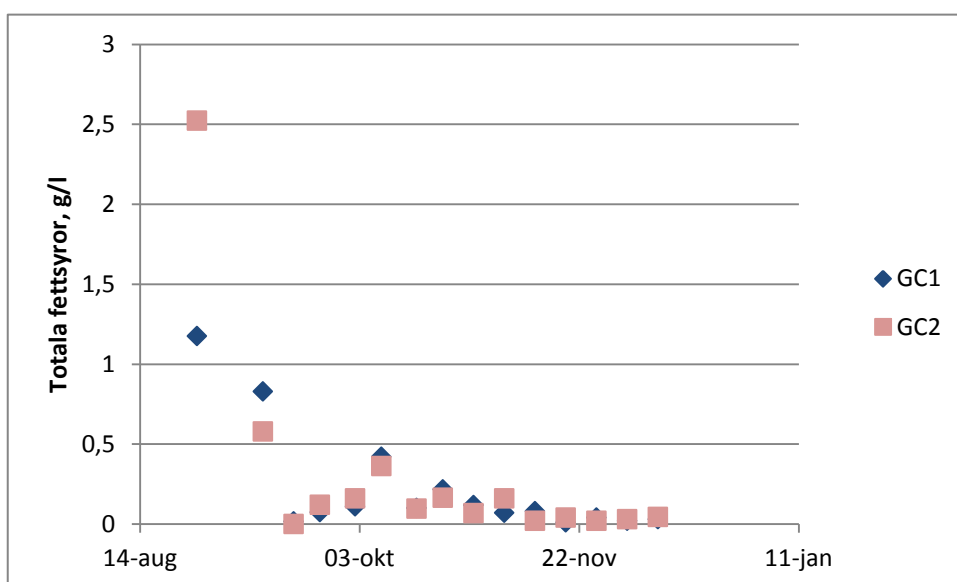
Datum för mätning	Substrathink påbörjad	Vilken fraktion, pastöriserat?	TS (% av våtvikt)	VS (% av TS)
20-aug	20-aug	Opast.	15,8	88
24-okt	24-sep	Past.	14,6	89
29-okt	24-sep	Past.	14,7	88,9
		Opast., vattenlab	14,6	88,3
		Opast., SLU	14,5	88,3
09-nov	07-nov	Opast., SLU	13,8	87,7

A.2 pH och fettsyror

Fettsyraproverna förbereddes i flera steg för att kunna analyseras. Först frystes proven ned över minst en natt, för att sedan tinas upp och centrifugeras i 15 min med hastigheten 11 000 varv/min. Från proven togs vätskan ovanför det som sedimenterat, supernatanten, ut och frystes under några timmar. Proven tinades sedan upp och centrifugerades i 10 min. Därefter blandades 450 µl av supernatanten med 75 µl 5 M svavelsyra. Proven centrifugerades i ytterligare 5 min varefter hela supernatanten fördes över till glasvialer. Därefter analyserades proven med vätskekromatografi, HPLC, av personal på Institutionen för mikrobiologi på SLU i Uppsala. pH och fettsyrehalter i labbreaktorerna visas i Figur 26 och Figur 27.



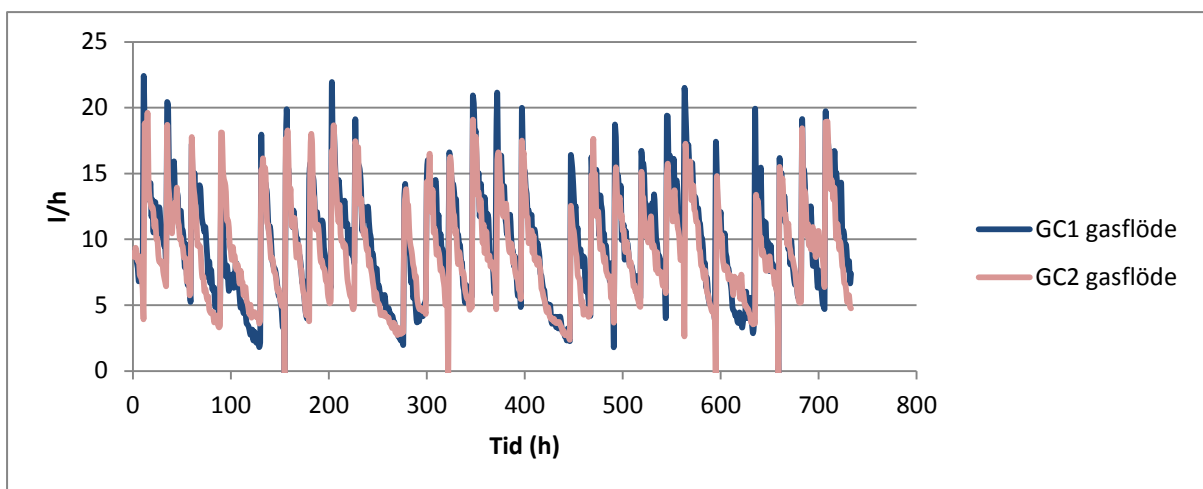
Figur 26. pH i labbreaktorerna.



Figur 27. Halt av totala fettsyror i labbreaktorerna.

A.3 Gasflöde

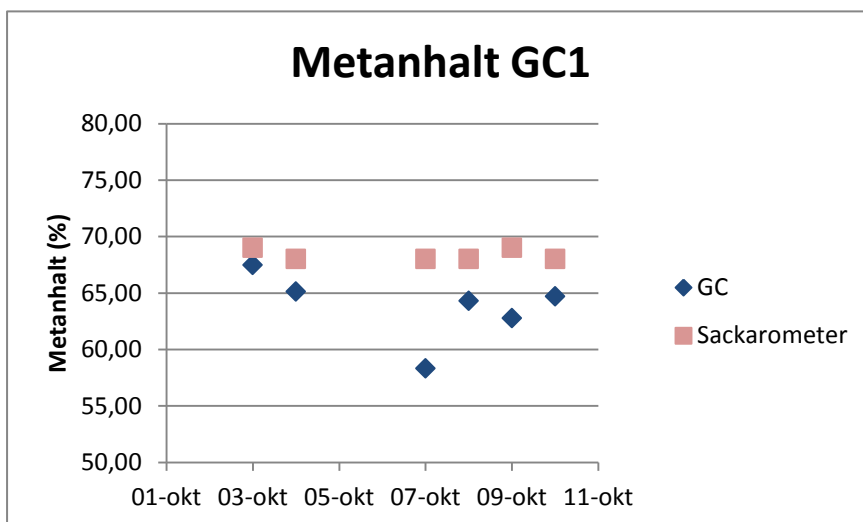
Loggningen av gasflödet under den sista månadens labbförsök visas i Figur 28. Från figuren kan utläsas att produktionen ökade efter matning för att sedan avta. Under relativt många dagar kan man se att produktionen från GC2 minskar något tidigare än GC1 börjar minska. Eftersom den totala produktionen var samma i båda reaktorerna tyder detta på att utrötningen gick något snabbare i GC2, det vill säga den reaktorn som matades med pastöriserat substrat.



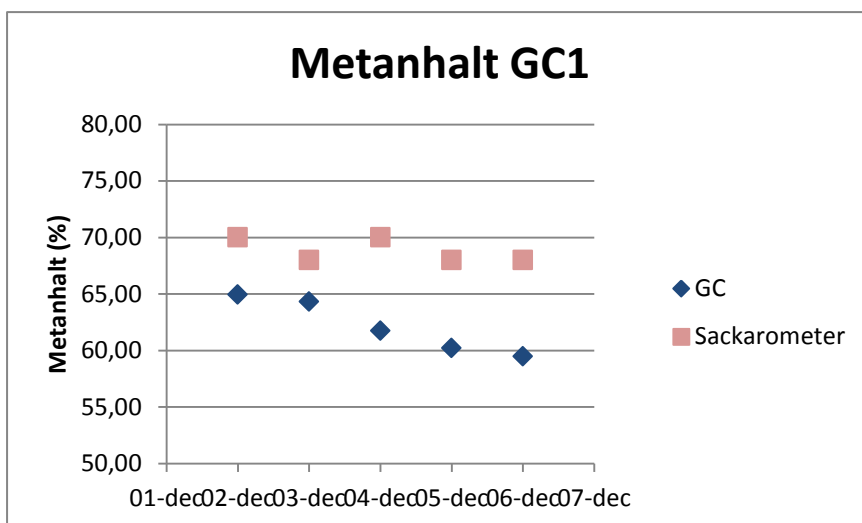
Figur 28. Gasproduktion från labbreaktorerna 13/11-13/12.

A.4 Gaskromatografianalys

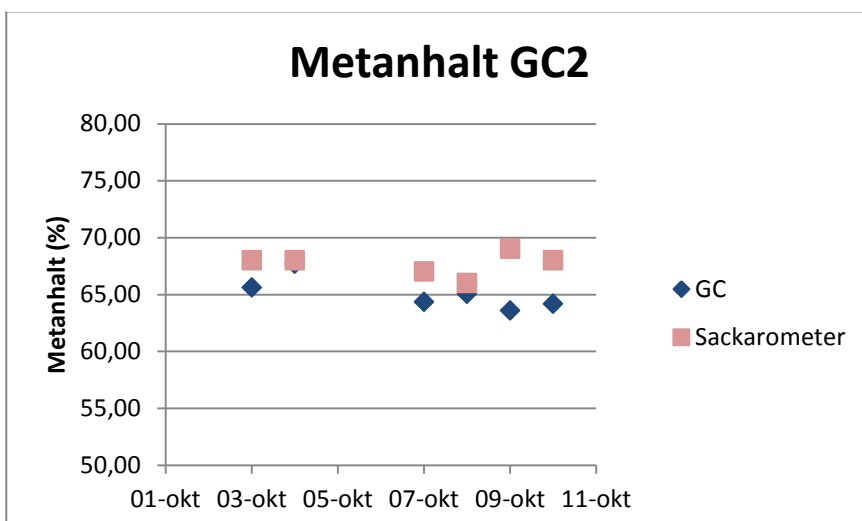
Resultatet från gaskromatografin visas i Figur 29-Figur 32. I beräkningarna av medelvärde och standardavvikelse har värdet för GC1 den 7/10 samt för GC2 den 6/12 exkluderats, eftersom de antogs vara felmätningar.



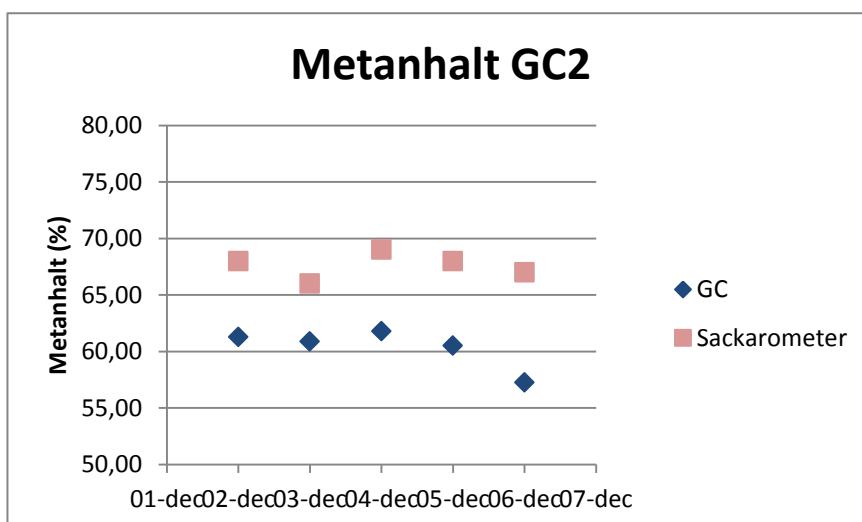
Figur 29. Metanhalt för GC1 3-10/10. Resultat från GC-analys jämfört med sackarometer. Datapunkten 7/10 har antagits vara felmätning.



Figur 30. Metanhalt för GC1 2-6/12. Resultat från GC-analys jämfört med sackarometer.



Figur 31. Metanhalt för GC2 3-10/10. Resultat från GC-analys jämfört med sackarometer.



Figur 32. Metanhalt för GC2 2-6/12. Resultat från GC-analys jämfört med sackarometer. Datapunkten 6/12 har antagits vara felmätning.

Bilaga B – Elförbrukning pumpar och omrörare

B.1 Drifttider och installerad effekt

De genomsnittliga drifttiderna för varje enhet visas i Tabell 6. Vid beräkningen av medelvärden har endast veckor då enheten har varit i drift tagits med. Onormala värden, exempelvis då cirkulationspumpen på bufferttanken var avställd under flera dagar, togs bort. Reservpumpen från sandavvattnaren (SUPU-205) avviker eftersom den inte har ersatt SUPU-204 under en hel vecka, utan bara några timmar i taget.

Tabell 6. Genomsnittlig drifttid (h/dygn) för alla enheter.

Namn	Funktion	Genomsnittlig drifttid (h/dygn)
SBP-001	Cirkulation bufferttank	23,9
SBP-002	Substrat till pastörisering	13,9
SBP-003	Substrat till pastörisering reserv	13,5
P-313	Vattenkrets vvx 2	Ej i drift
P-313A	Vattenkrets vvx 2 reserv	17,8
P-314	Vattenkrets vvx 3	17,8
P-314A	Vattenkrets vvx 3 reserv	Ej i drift
SUPU-201	Substrat från pastöriseringstank 1	0,7
SUPU-202	Substrat från pastöriseringstank 2	1,5
SUPU-203	Substrat från pastöriseringstank 3	0,9
SUPU-204	Substrat från sandavvattnare	18,1
SUPU-205	Substrat från sandavvattnare reserv	0,2
RRP-009	Rötrest från rötkammare 1	8,6
RRPU-302	Rötrest från rötkammare 2	9,3
P-311	Cirkulation rötkammare 1	23,9
RIPU-301	Cirkulation rötkammare 2	23,9
O-303	Omrörning pastöriseringstank 3	19,4
HYOR-02	Pastöriseringstank 1	19,3
HYOR-03	Pastöriseringstank 2	19,5
VCP-301	Vattenkrets (vvx)	8,8
VCP-15	Hetvattenkrets	23,9

Resultatet av kartläggningen av effektförbrukningen hos pumpar och omrörare kopplade till hygieniseringen visas i Tabell 7. Omrörarna visas i Tabell 8.

Tabell 7. Pumpar med koppling till hygieniseringsdelen. Namn, funktion, typ av pump, om frekvensomformare finns och i så fall av vilken typ, samt installerad effekt.

Namn	Funktion	Typ av pump	Frekvens- omformare	Installerad effekt (kW)
SUPU-201	Substrat från pastöriseringstank 1	Centrifugal	Ny	7,5
SUPU-202	Substrat från pastöriseringstank 2	Centrifugal	Ny	7,5
SUPU-203	Substrat från pastöriseringstank 3	Centrifugal	Ny	7,5
SUPU-204	Substrat från sandavvattnare	Slang	Ny	7,5
SUPU-205	Substrat från sandavvattnare, reserv	Skruv	Ny	4
RRPU-302	Rötrestart från röt-kammare 2	Skruv	Ny	7,5
RIPU-301	Cirkulation röt-kammare 2	Centrifugal	Ny	15
SBP-001	Cirkulation bufferttank	Centrifugal	Gammal	15
SBP-002	Substrat till pastörisering	Skruv	Gammal	4
SBP-003	Substrat till pastörisering, reserv	Skruv	Gammal	4
P-313	Vattenkrets vvx 2	Värmebärar, tvilling	Gammal	3
P-314	Vattenkrets vvx 3	Värmebärar, tvilling	Gammal	3
P-311	Cirkulation röt-kammare 1	Centrifugal	Gammal	5,5
RRP-009	Rötrestart från röt-kammare 1	Skruv	Gammal	4
VCP-301	Vattenkrets röt-kammarvärmning	Centrifugal	Ingen	5,5
VCP-15	Hetvattenkrets värmesystem	Centrifugal	Ingen	1,5
P-313A	Vattenkrets vvx 2, reserv	Värmebärar, tvilling	Ingen	3
P-314A	Vattenkrets vvx 3, reserv	Värmebärar, tvilling	Ingen	3

Tabell 8. Omrörare till pastöriseringstankarna.

Namn	Funktion	Frekvens- omformare	Installerad effekt (kW)
O-303	Pastöriseringstank 3	Gammal	1,5
HYOR-02	Pastöriseringstank 1	Ingen	1,5
HYOR-03	Pastöriseringstank 2	Ingen	1,5

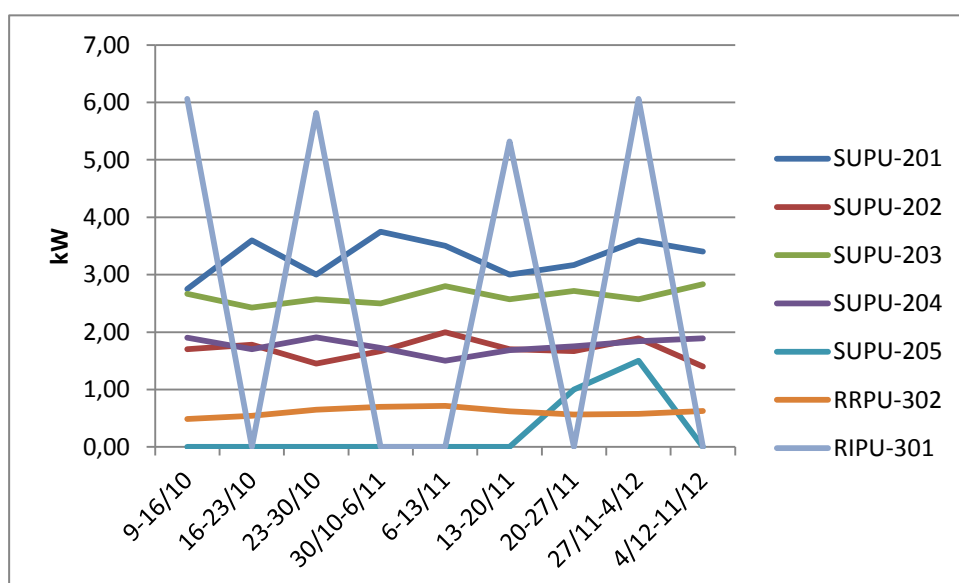
Pumpar och omrörare utan frekvensreglering antogs dra installerad effekt. Nedan beskrivs hur effektförbrukningen för pumpar med nya respektive gamla frekvensomformare togs fram.

B.2 Pumpar med nya frekvensomformare

Medelvärde för effektförbrukningen hos pumpar med nya frekvensomformare visas i Tabell 9. Effektförbrukningens variation vecka för vecka visas i Figur 33. Anledningen till de mycket varierande värdena för RIPU-301 är att energiförbrukningen mäts i MWh, vilket innebär att förbrukningen inte registrerats då den har varit lägre än 1 MWh. För alla pumpar antogs elförbrukningen under hela perioden kunna approximeras med medelvärdet som angavs ovan.

Tabell 9. Installerad effekt och uppmätt medeleffekt under perioden 9/10-11/12 för pumpar med nya frekvensomformare.

Namn	Funktion	Installerad effekt (kW)	Medeleffekt vid drift (kW)
SUPU-201	Substrat från pastöriseringstank 1	7,5	3,29
SUPU-202	Substrat från pastöriseringstank 2	7,5	1,64
SUPU-203	Substrat från pastöriseringstank 3	7,5	2,62
SUPU-204	Substrat från sandavvattnare	7,5	1,77
SUPU-205	Substrat från sandavvattnare reserv	4	1,25
RRPU-302	Rötrest från rötkammare 2	7,5	0,60
RIPU-301	Cirkulation rötkammare 2	15	2,66



Figur 33. Veckomedelvärden för effektförbrukningen hos pumpar med nya frekvensomformare.

B.3 Pumpar och omrörare med gamla frekvensomformare

Effektförbrukningen för pumpar med gamla frekvensomformare visas i Tabell 10.

Tabell 10. Installerad effekt och antagen medeleffekt vid drift, framtagen i kontakt med tillverkare, för pumpar och omrörare med gamla frekvensomformare.

Namn	Funktion	Installerad effekt (kW)	Medeleffekt vid drift (kW)
SBP-001	Cirkulation bufferttank	15	5,56
SBP-002	Substrat till pastörisering	4	0,781
SBP-003	Substrat till pastörisering, reserv	4	0,781
P-313	Vattenkrets vvx 2	3	1,8
P-314	Vattenkrets vvx 3	3	1,8
P-311	Cirkulation rötkammare 1	5,5	5,41
RRP-009	Rötrest från rötkammare 1, låg	4	0,326
RRP-009	Rötrest från rötkammare 1, hög	4	0,781
O-303	Omrörning pastöriseringstank 3	1,5	0,9

Effektförbrukning för dessa pumpar och omrörare togs fram i samarbete med tillverkare. Nedan visas vilka antaganden som gjorts för respektive enhet.

B.3.1 SBP-001 – cirkulationspump bufferttank

Cirkulationspumpen arbetar vid frekvenser mellan 30 och 40 Hz. Över kortare tidsperioder är frekvensen relativt konstant, men flödet varierar mellan 20 och 140 m³/h beroende på substratets sammansättning (Malmros, pers. medd., 2013). Oftast är flödet 70-90 m³/h. För framtagning av effektförbrukning valdes en driftpunkt trots att detta medför fel då effektförbrukningen varierar relativt mycket. För att få en mer exakt uppskattning hade drifttider, frekvens och flöde behövt avläsas med avsevärd täthet, något som ansågs orimligt.

Effektförbrukningen antogs vara 5,56 kW, vilket gäller vid frekvensen 35 Hz och flödet 24 l/s (86,4 m³/h) (Ringh, pers. medd., 2013).

B.3.2 SBP-002 och SBP-003 – substrat till pastörisering

Skruvpumparna går stabilt på 65 Hz och ger 7,8 m³/3 vid 2,5 bars mottryck. Detta ger en effektförbrukning på 0,781 kW (Cleréus, pers. medd., 2013).

B.3.3 P-313 och P-314 – vattenkrets vid värmeväxling av substrat

Vattenpumparna reglerar på frekvensen och går mycket stabilt på 40 Hz. Vid ett mottryck på 1 bar ger detta en effektförbrukning på 1,8 kW enligt pumpkurvan för modellen (LPDE 100-125/124) (Grundfos, 2013).

B.3.4 P-311 – cirkulation rötkammare 1

Cirkulationspumpen håller stabilt 45 Hz och ger ett flöde på ca 120 m³/h. Vid denna driftpunkt har den effektförbrukningen 5,41 kW (Gustafsson, pers. medd., 2013).

B.3.5 RRP-009 – rötrest från rötkammare

Rötrestpumpen hade vid framtagandet av effektförbrukningen en lägre driftpunkt, eftersom påfyllning av rötkammaren pågick och urpumpningen därför var mindre. Då var frekvensen 60 Hz, flödet 4 m³/h och mottrycket 1,1 bar, vilket ger en effektförbrukning på 0,326 kW (Cleréus, pers. medd., 2013). När urpumpningen sedan ökades var mottrycket ca 2,5 bar och flödet något högre än hos skruvpumparna före pastöriseringen. Eftersom pumparna var av samma modell antogs effektförbrukningen efter den 25/10 vara 0,781 kW.

B.3.6 O-303 – omrörare till pastöriseringstank 3

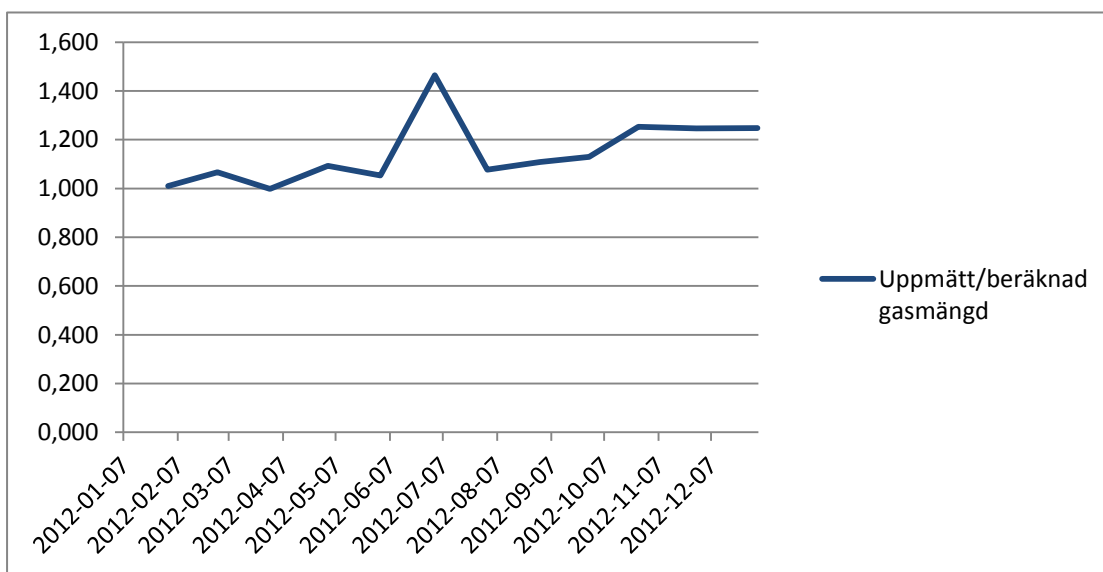
Omröraren arbetade vid 35 Hz, men elförbrukningen visade sig vara svår att ta fram, eftersom tillverkaren hade gått i konkurs och det saknades dokumentation. Hur mycket effekt en omrörare drar påverkas av propellerdiametern, antalet blad, stigning på bladen, varvtal samt mediets densitet och viskositet (Werdien, pers. medd., 2013). Genom kontakt med en annan tillverkare av omrörare fastslogs att 60 % av installerad effekt var en tillräckligt bra uppskattning vid 35 Hz. Eftersom den installerade effekten var liten skulle ett fel inte påverka slutresultatet i stor utsträckning och noggrannheten var därför inte så viktig (Werdien, pers. medd., 2013). Effekten antogs därför vara 0,9 kW.

Bilaga C – Korrigering av gasflödesmätning

Två felkällor gjorde att pannans biogasförbrukning överskattades. För det första satt mätaren i närheten av gaskompressorer som fick den att vibrera, vilket ledde till att mätaren uppfattade ett flöde även när pannan var avstängd. Troligen överskattades även flödet när pannan användes. Dessutom satt tryckgivaren som användes för volymberäkningen före en strypning, vilket betyder att trycket vid mätaren egentligen var lägre än vad det såg ut att vara.

En korrigeringsfaktor togs fram genom kontakt med tillverkaren av brännaren. Pannan har två regleringssteg – låg- och höglast. Då brännaren installerades gjordes en mätning av vilka biogasflöden den drog på de olika stegen, vilket var 47 m³/h på låglast och 74 m³/h på höglast (Weselius, pers. medd., 2013). Enligt tillverkaren bör inte dessa värden förändras nämnvärt över tid (Weselius, pers. medd., 2013).

Bland anläggningens dokumentation finns data på pannans drifttider vid de olika stegen. Dessa läses av ungefär en gång per vecka. Utifrån drifttider samt flödena erhållna från tillverkaren beräknades den teoretiska förbrukningen av biogas för varje månad under 2012. Förbrukningen jämfördes med de uppmätta värdena under samma månader, och kvoten mellan dessa visas i Figur 34. Där kan man se att den uppmätta gasförbrukningen är större än den beräknade, vilket stöder tesen att mätningen överskattar förbrukningen. Därför borde det uppmätta värdet korrigeras ner. Inget samband mellan hur stor del av tiden pannan gick på låglast och kvotens storlek kunde urskiljas, och därför gjordes förenklingen att mätningen över tid hade samma fel. Medelvärde för kvoten under 2012 var 1,146 och alla värden för pannans gasförbrukning dividerades med den. Under mätperiodens sista vecka hade mätaren flyttats och felkällorna antogs inte längre existera. Dessa data korrigerades därför inte med kvoten.



Figur 34. Kvot mellan uppmätt gasflöde till pannan under 2012 och beräknat gasflöde utifrån drifttider och tillverkarens uppgifter.

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energioghteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000